



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS
NATURALES

CARRERA DE INGENIERÍA EN MEDIO AMBIENTE

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**“MODELAMIENTO CON SWAT Y GR2M PARA LA SUBCUENCA DEL RÍO
GUAYLLABAMBA”**

Proyecto de Investigación presentado previo a la obtención del Título de Ingeniero en Medio Ambiente.

Autores:

Karen Estefania Gallo Llumigusin

Bryan Antonio Iza Jiménez

Director:

Ing. Renán Arturo Lara Landázuri M.Sc.

Latacunga – Ecuador

Marzo – 2018

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros **Karen Estefania Gallo Llumigusin y Bryan Antonio Iza Jiménez**, declaramos ser autores del presente proyecto de investigación: **Modelamiento con SWAT y GR2M para la Subcuenca del Río Guayllabamba**, siendo Mg. Renán Arturo Lara Landázuri, tutor del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además. certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

.....
Gallo Llumigusin Karen Estefania

Número de C.I. 1725920845

.....
Iza Jiménez Bryan Antonio

Número de C.I. 2200134696

CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR

Comparecen a la celebración del presente instrumento de cesión no exclusiva de obra, que celebran de una parte **GALLO LLUMIGUSIN KAREN ESTEFANIA**, identificado con C.C. N° **172592084-5**, de estado civil **SOLTERO** y con domicilio Panamericana Norte Barrio La Avanzada cantón Mejía, e **IZA JIMÉNEZ BRYAN ANTONIO**, identificado con C.C. N° **2200134696**, de estado civil **SOLTERO** y con domicilio, Hermanas Páez – Quijano y Ordoñez, Latacunga, quienes en lo sucesivo se denominarán **LAS/LOS CEDENTES**; y, de otra parte, el Ing. MBA. Cristian Fabricio Tinajero Jiménez, en calidad de Rector y por tanto representante legal de la Universidad Técnica de Cotopaxi, con domicilio en la Av. Simón Rodríguez Barrio El Ejido Sector San Felipe, a quien en lo sucesivo se le denominará **LA CESIONARIA** en los términos contenidos en las cláusulas siguientes:

ANTECEDENTES: CLÁUSULA PRIMERA.- LA/EL CEDENTE es una persona natural estudiante de la carrera de Ingeniería en Medio Ambiente, titular de los derechos patrimoniales y morales sobre el trabajo de grado de titulación de Proyecto de Investigación la cual se encuentra elaborada según los requerimientos académicos propios de la Unidad Académica según las características que a continuación se detallan:

Historial académico.- (Septiembre 2012 – Febrero 2013 hasta Octubre 2017 – Marzo 2018).

Aprobación HCA.- 25 de Abril de 2017.

Tutor.- M.Sc. Renán Arturo Lara Landázuri

Tema: **“MODELAMIENTO CON SWAT Y GR2M PARA LA SUBCUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA”**

CLÁUSULA SEGUNDA.- LA CESIONARIA es una persona jurídica de derecho público creada por ley, cuya actividad principal está encaminada a la educación superior formando profesionales de tercer y cuarto nivel normada por la legislación ecuatoriana la misma que establece como requisito obligatorio para publicación de trabajos de investigación de grado en su repositorio INSTITUCIONAL, hacerlo en formato digital de la presente investigación.

CLÁUSULA TERCERA.- Por el presente contrato, **LA/EL CEDENTE** autoriza a **LA CESIONARIA** a explotar el trabajo de grado en forma exclusiva dentro del territorio de la República del Ecuador.

CLÁUSULA CUARTA.- OBJETO DEL CONTRATO: Por el presente contrato **LA/EL CEDENTE**, transfiere definitivamente a **LA CESIONARIA** y en forma exclusiva los siguientes derechos patrimoniales; pudiendo a partir de la firma del contrato, realizar, autorizar o prohibir:

- a) La reproducción parcial del trabajo de grado por medio de su fijación en el soporte informático conocido como repositorio INSTITUCIÓNal que se ajuste a ese fin.
- b) La publicación del trabajo de grado.
- c) La traducción, adaptación, arreglo u otra transformación del trabajo de grado con fines académicos y de consulta.
- d) La importación al territorio nacional de copias del trabajo de grado hechas sin autorización del titular del derecho por cualquier medio incluyendo mediante transmisión.
- f) Cualquier otra forma de utilización del trabajo de grado que no está contemplada en la ley como excepción al derecho patrimonial.

CLÁUSULA QUINTA.- El presente contrato se lo realiza a título gratuito por lo que **LA CESIONARIA** no se halla obligada a reconocer pago alguno en igual sentido **LA/EL CEDENTE** declara que no existe obligación pendiente a su favor.

CLÁUSULA SEXTA.- El presente contrato tendrá una duración indefinida, contados a partir de la firma del presente instrumento por ambas partes.

CLÁUSULA SÉPTIMA.- CLÁUSULA DE EXCLUSIVIDAD.- Por medio del presente contrato, se cede en favor de **LA CESIONARIA** el derecho a explotar la obra en forma exclusiva, dentro del marco establecido en la cláusula cuarta, lo que implica que ninguna otra persona incluyendo **LA/EL CEDENTE** podrá utilizarla.

CLÁUSULA OCTAVA.- LICENCIA A FAVOR DE TERCEROS.- **LA CESIONARIA** podrá

licenciar la investigación a terceras personas siempre que cuente con el consentimiento de **LA/EL CEDENTE** en forma escrita.

CLÁUSULA NOVENA.- El incumplimiento de la obligación asumida por las partes en la cláusula cuarta, constituirá causal de resolución del presente contrato. En consecuencia, la resolución se producirá de pleno derecho cuando una de las partes comunique, por carta notarial, a la otra que quiere valerse de esta cláusula.

CLÁUSULA DÉCIMA.- En todo lo no previsto por las partes en el presente contrato, ambas se someten a lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, Código Civil y demás del sistema jurídico que resulten aplicables.

CLÁUSULA UNDÉCIMA.- Las controversias que pudieran suscitarse en torno al presente contrato, serán sometidas a mediación, mediante el Centro de Mediación del Consejo de la Judicatura en la ciudad de Latacunga. La resolución adoptada será definitiva e inapelable, así como de obligatorio cumplimiento y ejecución para las partes y, en su caso, para la sociedad. El costo de tasas judiciales por tal concepto será cubierto por parte del estudiante que lo solicitare.

En señal de conformidad las partes suscriben este documento en dos ejemplares de igual valor y tenor en la ciudad de Latacunga, a los 23 días del mes de febrero del 2018.

Karen Estefania Gallo Llumigusin

EL CEDENTE

Bryan Antonio Iza Jiménez

EL CEDENTE

Ing. MBA. Cristian Tinajero Jiménez

EL CESIONARIO

AVAL DEL DIRECTOR DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

En calidad de Director del Trabajo de Investigación sobre el tema:

“MODELAMIENTO CON SWAT Y GR2M PARA LA SUBCUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA”, de **IZA JIMÉNEZ BRYAN ANTONIO** con C.C.2200134696 y **GALLO LLUMIGUSIN KAREN ESTEFANIA** con C.C.1725920845, de la carrera de INGENIERÍA DE MEDIO AMBIENTE, considero que dicho Informe Investigativo cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de Validación de Proyecto que el Honorable Consejo Académico de la Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, Febrero de 2018

Firma

TUTOR DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Ing. Renán Lara M.Sc.

C.C. 0400488011

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales; por cuanto, los postulantes: **IZA JIMÉNEZ BRYAN ANTONIO** con C.C.2200134696 y **GALLO LLUMIGUSIN KAREN ESTEFANIA** con C.C.1725920845, han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de Sustentación de Proyecto.

Por lo antes expuesto, se autoriza realizar los empastados correspondientes, según la normativa INSTITUCIONAL.

Latacunga, Febrero de 2018

Para constancia firman:

.....
LECTOR 1

Ing. Mercy Ilbay Mg.

C.C. 0604147900

.....
LECTOR 2

Ing. Juan Espinosa Mg.

C.C. 1713474326

.....
LECTOR 3

Ing. Vinicio Mogro M.Sc

C.C. 0501657514

AGRADECIMIENTO

Este proyecto es el resultado del esfuerzo en conjunto con nuestro tutor y lectores, por el apoyo académico y moral que nos brindaron. Además de la confianza otorgada para el fortalecimiento de lazos entre estudiante- docente. A la familia quien fue el eje fundamental para el alcance de este logro, no solo por el aspecto económico, sino también, por los valores morales recibidos que se puso en práctica en nuestra vida universitaria.

Karen Estefania Gallo Llumigusin:

En especial a mi madre la señora Blanca Gallo por todo el cariño y apoyo incondicional a lo largo de mi vida para llegar a ser mejor.

Bryan Antonio Iza Jiménez:

Deici Jiménez quien fue la persona que me respaldó incluso en los momentos más complicados en mi vida.

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a mi madre la señora Blanca Gallo por su fortaleza, apoyo incondicional en cada momento evitando que me rindiera y su lucha constante para que consiga un buen futuro. A mi familia por su confianza, ayuda y motivación en cada paso que doy. A mis amigas por su amistad verdadera que me demostraron en los momentos buenos y malos que en la vida he enfrentado.

Karen Estefania Gallo Llumigusin

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES

TITULO:” MODELAMIENTO CON SWAT Y GR2M PARA LA SUBCUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA”

Autor/es: Gallo LLumigusin Karen Estefania
Iza Jiménez Bryan Antonio

RESUMEN

El crecimiento poblacional y la expansión urbana provocan presión sobre el recurso hídrico en la subcuenca del Río Guayllabamba (SRG). En la actualidad la demanda por este recurso se ha incrementado, afectando las fuentes superficiales, subterráneas, zonas de recarga y cauce del río. Es por ello, que se realizó un modelamiento hidrológico en la SRG con el fin de conocer el comportamiento (dinámica) del caudal en la zona. En este estudio se compararon dos modelos hidrológicos: SWAT (semi-distribuido) y GR2M (agregado), con un periodo de 22 años (1983-2004) para la calibración y 9 años (2005-2013) para la validación, evaluados mediante los índices de Nash-Sutcliffe y el coeficiente de determinación (R^2). Se consideraron los datos de precipitación y temperatura de 19 estaciones meteorológicas y una hidrológica. Para GR2M fue necesaria información hidrometeorológica mensual y para SWAT se utilizó los datos del motor climático “Reanálisis del sistema de pronóstico del clima”, para el periodo de 1982 – 2013. El modelo GR2M alcanzó una eficiencia satisfactoria, tanto en el período de calibración, como de validación, con un coeficiente de Nash y R^2 mayor que 0.60. Por otro lado, SWAT presentó los criterios de evaluación menores que el rango establecido, calificándolo como “insuficiente”, para la representación de caudales en el área de estudio. En conclusión, se puede señalar que, GR2M siendo un modelo de lluvia- escorrentía que no considera factores de la cuenca como: el uso de suelo, tipo de suelo, pendiente, puede generar resultados más eficientes en simulación que el modelo SWAT.

Palabras clave: GR2M, SWAT, simulación, modelización, hidrometeorológica, caudal.

TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI

AGRICULTURAL AND NATURAL RESOURCES FACULTY

TITLE: "Modelling with SWAT and GR2M for the Guayllabamba River Sub-basin".

Author: Gallo Llumigusin Karen Estefania
Iza Jiménez Bryan Antonio

ABSTRACT

Demographic growth and urban expansion cause pressure on the water resource in the sub-basin of the Guayllabamba River (SRG). At present, the demand for this supply has increased, affecting the surface, underground, recharge and riverbed sources. For this reason, a hydrological modelling was carried out in the SRG in order to know the behavior of the flow in the area. In this study, two hydrological models were compared: SWAT (semi-distributed) and GR2M (aggregate), with a period of 22 years (1983-2004) for calibration and 9 years (2005-2013) for validation, evaluated by the Nash-Sutcliffe index and the coefficient of determination (R^2). The precipitation and temperature data of nineteen meteorological stations and a hydrological were considered. For GR2M, the Hydrometeorological information was required monthly and for SWAT the climatic engine data "Reanalysis of the climate forecasting system" was used for the period 1982 -2013. The GR2M model achieved a satisfactory efficiency, both in the calibration period as well as validation, with a Nash coefficient and R^2 greater than 0.60. On the other hand, SWAT presented the evaluation criteria lower than the established range, qualifying it as "insufficient" for the representation of flows in the study area. In conclusion, it can be pointed out that, GR2M being a rainfall-runoff model that does not consider basin factors such as: land use, soil type, slope, can generate more efficient results in simulation than the SWAT model.

Keywords: GR2M, SWAT, simulation, modeling, Hydrometeorological, flow.

ÍNDICE GENERAL

DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	ii
CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR	iii
AGRADECIMIENTO.....	viii
DEDICATORIA.....	ix
RESUMEN	x
ABSTRACT	xi
ÍNDICE GENERAL.....	xii
ÍNDICE DE FIGURAS	xvi
ÍNDICE DE TABLAS	xviii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xix
ACRÓNIMOS Y SIGLAS.....	xx
1. INFORMACIÓN GENERAL	1
2. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO.....	2
3. BENEFICIARIOS DEL PROYECTO	3
4. EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	4
5. OBJETIVOS.....	5
5.1. General.....	5
5.2. Específicos	5
6. ACTIVIDADES Y SISTEMA DE TAREAS EN RELACION A LOS OBJETIVOS PLANTEADOS	6
7. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICA	7
7.1. Ciclo Hidrológico.....	7
7.1.1. Condensación.....	7
7.1.2. Infiltración	7
7.1.3. Precipitación	7

7.1.4.	Evaporación	8
7.1.5.	Transpiración.....	8
7.1.6.	Evapotranspiración.....	8
7.1.7.	Escorrentía	9
7.1.7.1.	Escorrentía Superficial.....	9
7.1.7.2.	Escorrentía Sub-superficial	9
7.1.7.3.	Escorrentía Subterránea	10
7.2.	Balance hídrico	10
7.3.	Cuenca hidrográfica.....	10
7.3.1.	Subcuenca.....	11
7.3.2.	Microcuenca.....	11
7.3.3.	Sistema de drenaje.....	11
7.4.	Parámetros morfométricos de una cuenca	11
7.4.1.	Parámetros asociados a la forma de la cuenca	12
7.4.2.	Parámetros de Relieve	12
a)	Altura y elevación.....	12
b)	Topografía.....	13
c)	Pendiente del terreno.....	13
d)	Pendiente de la corriente principal	13
e)	Pendiente media de la cuenca	13
7.5.	Propiedades características de una cuenca	14
7.5.1.	Suelo.....	14
7.5.1.1.	Tipo de suelo.....	14
7.5.1.2.	Uso de Suelo	14
7.6.	Modelación de cuencas.....	15

7.6.1.	Modelo Hidrológico	15
7.6.1.1.	Clasificación de modelos hidrológicos.....	16
7.6.3.	Modelo agregado GR2M	17
7.6.4.	Modelo semidistribuido SWAT.....	18
7.6.4.1.	Unidad de respuesta hidrológica.....	20
7.7.	Métodos de completación de datos.....	20
7.7.1.	Método de vector regional.....	20
7.7.2.	Regresión Lineal.....	21
7.7.3.	Media Mensual	21
7.8.	Calibración y Validación de Resultados	22
7.8.1.	Calibración.....	22
7.8.2.	Validación.....	22
7.8.3.	Criterios de evaluación	23
7.8.3.1.	Coefficiente de Nash y Sutcliffe	23
7.8.3.2.	Coefficiente de determinación R^2	24
8.	PREGUNTAS CIENTÍFICAS O HIPÓTESIS.....	24
9.	METODOLOGÍA	25
9.1.	Área de estudio	26
9.2.	Recolección de datos hidrometeorológicos	27
9.3.	Completación de datos de las estaciones meteorológicas.....	28
9.3.1.	Precipitación de la subcuenca	28
9.3.1.1.	Método del vector regional para completación de datos.....	30
9.3.1.2.	Regresión lineal para completación de datos de las estaciones de la cuenca baja	30
9.3.1.3.	Media mensual de la precipitación de la subcuenca.....	31
9.3.2.	Temperatura de la Subcuenca	32

9.3.2.1. Media mensual para la completación de datos de temperatura	32
9.3.3. Caudal de la Subcuenca del Río Guayllabamba	34
9.3.3.1. Media mensual para completación de datos de caudal.	34
9.4. Cálculo de la evapotranspiración (EP) de la subcuenca	35
9.5. Modelamiento con GR2M	36
9.6. Modelamiento con SWAT	36
9.6.1. DEM	36
9.6.2. Uso de suelo	38
9.6.3. Tipo de Suelo.....	39
9.6.4. Pendiente	40
9.6.5. Determinación de las HRUs	41
9.6.6. Ingreso de los datos meteorológicos.....	41
10. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS:.....	42
10.1. Modelo GR2M.....	42
10.1.1. Calibración y validación.....	42
10.2. Modelo SWAT.....	44
10.2.1. Calibración y validación.....	45
10.3. Comparación del desempeño de los modelos GR2M y SWAT.....	46
11. IMPACTOS (TÉCNICOS, SOCIALES, AMBIENTALES O ECONÓMICOS)	50
12. PRESUPUESTO PARA LA PROPUESTA DEL PROYECTO.....	51
13. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	52
13.1. Conclusiones.....	52
13.2. Recomendaciones.....	52
14. BIBLIOGRAFÍA	53
15. ANEXOS.....	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Arquitectura modelos GR2M de Mouelhi (2003).....	17
Figura 2: Esquema de procesos hidrológicos simulados en SWAT.....	19
Figura 3: Fases del proyecto	25
Figura 4: Ubicación de la Subcuenca del Río Guayllabamba	26
Figura 5: Precipitación media mensual para el período 1982-2013 (mm/mes) de las catorce estaciones pluviométricas de la subcuenca alta del Río Guayllabamba	29
Figura 6: Precipitación media mensual para el período 1982-2013 (mm/mes) de las cuatro estaciones pluviométricas de la subcuenca baja del Río Guayllabamba	29
Figura 7: Diagrama de dispersión entre la estación M0339 y M1181.....	31
Figura 8: Delimitación de la Subcuenca del Río Guayllabamba	37
Figura 9: Sistema de drenaje de la Subcuenca del Río Guayllabamba	37
Figura 10: Distribución del uso de suelo de la Subcuenca del Río Guayllabamba	38
Figura 11: Distribución del tipo de suelo en la Subcuenca del Río Guayllabamba.....	39
Figura 12: Mapa de pendiente de la Subcuenca del Río Guayllabamba	40
Figura 13: Unidades de respuesta hidrológicas de la Subcuenca del Río Guayllabamba.....	41
Figura 14: Arquitectura del modelo GR2M del período calibración (1982-2004) y validación (2005-2013).....	42
Figura 15: Calibración y validación del modelo GR2M para la Subcuenca del Río Guayllabamba con los valores de precipitación, caudales observados y simulados, a) hidrograma de calibración para el período 1982-2004 y b) hidrograma de validación para el período 2005-2013	43
Figura 16: Proceso hidrológico simulado por SWAT. a) Período de calibración (1982-2004) y b) período de validación (2005-2013).....	44
Figura 17: Calibración y validación del modelo SWAT para la Subcuenca del Río Guayllabamba con los valores de precipitación, caudales observados y simulados, a) hidrograma de calibración para el período 1982-2004 y b) hidrograma de validación para el período 2005-2013	45
Figura 18: Diagrama de dispersión de a) calibración (1983-2004) y b) validación (2005-2013) entre los caudales simulados por GR2M y los caudales observados.....	47
Figura 19: Diagrama de dispersión de a) calibración (1983-2004) y b) validación (2005-2013) entre los caudales simulados por SWAT y los caudales observados.....	48

Figura 20: Calibración y validación del modelo GR2M y SWAT para la Subcuenca del Río Guayllabamba con los caudales observados y simulados. a) Hidrograma de calibración para el período 1982-2004, b) hidrograma de validación para el período 2005-201349

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Beneficiarios directos.....	3
Tabla 2: Beneficiarios indirectos.....	3
Tabla 3: Valores referenciales del Criterio de Nash	23
Tabla 4: Características de las estaciones del Ecuador, periodo 1982 al 2013	27
Tabla 5: Coeficiente de correlación entre las estaciones M0023 – M0113 – M0339 – M0855 – M1181 con datos faltantes	30
Tabla 6: Valores de la media mensual de precipitación, a) estación M0023, b) estación M0113, c) estación M0855.....	32
Tabla 7: Valores de la media mensual de temperatura, a) estación M0001, b) estación M0002, c) estación M0023, d) estación M0024, e) estación M0120, f) estación M0855, g) estación M118133	
Tabla 8: Valores de la media mensual de caudal, estación H0170	34
Tabla 9: Análisis de datos: estadística descriptiva de la estación H0170 con datos completos....	35
Tabla 10: Latitud de las estaciones meteorológicas en la subcuenca del Río Guayllabamba	35
Tabla 11: Descripción de los usos de suelo de la Subcuenca del Río Guayllabamba	38
Tabla 12: Descripción de los tipos de suelo de la Subcuenca del Río Guayllabamba.....	39
Tabla 13: Descripción de las pendientes de la Subcuenca del Río Guayllabamba.....	40
Tabla 14: Parámetros utilizados para calibración y validación del modelo GR2M y SWAT	46
Tabla 15: Criterios de eficiencia para los modelos GR2M y SWAT	48

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Hoja de vida	57
Anexo 2: Aval de traducción.....	60
Anexo 3: Mapa de Isoyetas de la Subcuenca del Río Guayllabamba.....	61
Anexo 4: Representación gráfica del vector regional de la Subcuenca alta del Río Guayllabamba precipitación de las estaciones	62
Anexo 5: Representación gráfica del vector regional de la Subcuenca alta del Río Guayllabamba precipitación de las estaciones restantes	68
Anexo 6: Distribución detallada del uso de suelo, tipo de suelo y pendiente de la Subcuenca del Río Guayllabamba.....	74

ACRÓNIMOS Y SIGLAS

EP: Evapotranspiración.

CATEDU: Centro Aragonés de Tecnologías para la Educación

CEMAGREF: Centro de Investigación Agrícola e Ingeniería Ambiental, Francia

CFSR: Reanálisis del sistema de pronóstico del clima

CGIAR-CSI: Consortium for Spatial Information

GR2M: Global rainfall-runoff two parameter model

INAMHI: Instituto Nacional de Meteorología en Hidrología

INEC: Instituto Nacional de Estadística y Censos.

SRG: Subcuenca del Río Guayllabamba

SWAT: Soil and Water Assessment Tool.

MVR: Método del Vector Regional.

HRU: Unidad de Respuesta Hidrológica.

DED: Desviación Estándar de los Desvíos.

FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura

USGS: Servicio Geológico de los Estados Unidos

GAD: Gobierno autónomo descentralizado

1. INFORMACIÓN GENERAL

Título del Proyecto:

Modelamiento con SWAT y GR2M para la Subcuenca del Río Guayllabamba

Fecha de inicio:

Abril 2017

Fecha de finalización:

Marzo 2018

Lugar de ejecución:

Subcuenca del Río Guayllabamba – Pichincha – Imbabura – Esmeraldas – Ecuador

Facultad que auspicia:

Faculta de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales

Carrera que auspicia:

Ingeniería en Medio ambiente

Proyecto de investigación vinculado:

Equipo de Trabajo:

Karen Estefania Gallo Llumigusin

Bryan Antonio Iza Jiménez

Tutor: M.Sc. Renán Arturo Lara Landázuri

Lectores: Mg. Mercy Lucila Ilbay Yupa

MSc. Juan Miguel Espinosa Soto

M.Sc. Yenson Vinicio Mogro Cepeda

Área de Conocimiento:

UNESCO - Área de servicios: Protección del Medio Ambiente y Seguridad.

Línea de investigación:

Tecnologías de la información y Diseño Gráfico

Sub líneas de investigación de la Carrera:

Salud, Seguridad y Ambiente.

2. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

La escasa información de modelos de precipitación- esorrentía de la Subcuenca del Río Guayllabamba (SRG), limita una gestión territorial adecuada que ante factores como el crecimiento urbano y la expansión poblacional, ocasionan la alteración del equilibrio ecológico dentro de la cuenca, es por ello que el presente trabajo investigativo proporcionó una herramienta que pronosticó la cantidad del flujo superficial con relación a las precipitaciones propias de la zona, permitiendo realizar planes, estrategias de prevención y acción por parte de las autoridades competentes involucradas con la subcuenca.

Esta investigación se consideró de alta relevancia porque ayudará a proponer planes de ordenamiento territorial con sustento científico para su realización. Los impactos asociados con el proyecto fueron:

- Económico: que trata sobre las pérdidas en valores monetarios.
- Social: que trata sobre una ubicación segura de la población, regulada por el ente pertinente.
- Político: que permitiría una gestión territorial adecuada y con fundamentos.
- Ambiental: que trata sobre el desequilibrio ecológico.

3. BENEFICIARIOS DEL PROYECTO

Tabla 1: Beneficiarios directos

Provincia	Cantón	Entidades	
Pichincha	- Puerto Quito	- GAD. Parroquiales - GAD. Municipales de los cantones. - GAD. Provincial de Pichincha	- Secretaria de Gestión de Riesgos - Secretaría del Agua
	- Pedro Vicente Maldonado		
	- Pedro Moncayo		
	- San Miguel de los Bancos		
	- Mejía		
	- Rumiñahui		
	- Cayambe		
	- Quito		
Imbabura	- Cotacachi	- GAD. Parroquiales	
	- Otavalo	- GAD. Municipales de los cantones.	
	- Las Golondrinas	- GAD. Provincial de Imbabura	
Esmeraldas	- Quinindé	- GAD. Parroquiales	
	- Eloy Alfaro	- GAD. Municipales de los cantones. - GAD. Provincial de Esmeraldas	

Elaborado por: Los autores (2018)

Tabla 2: Beneficiarios indirectos

Provincia	Hombres	Mujeres	Total
Pichincha	1.255.711	1.320.576	2.576.287 hab
Imbabura	193.664	204.580	398.244 hab
Esmeraldas	271.312	262.780	534.092 hab

Fuente: Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), 2010.

Elaborado por: Los autores (2018)

4. EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

El crecimiento poblacional y la expansión urbana provocan presión sobre el recurso hídrico en la SRG. El agua es necesario para satisfacer las necesidades cotidianas como el consumo, riego, recreación y producción. En la actualidad la demanda por este recurso se ha incrementado, afectando las fuentes superficiales, subterráneas, zonas de recarga y cauce del río. Si consideramos la población de la provincia de Pichincha de 2.576.287 (INEC, 2010), a una tasa de crecimiento de 1,95% (Censos de Población y Vivienda 2001 y 2010), en el 2030 a través de la NT-1-HA-OO1 se proyectó que la población será de 3.311.527 hab. Para este año la presión sobre el recurso hídrico aumentará, siendo necesario conocer el comportamiento del caudal en el tiempo para poder proponer un plan de manejo del agua en la SRG.

Además, en la parte alta la disponibilidad del líquido vital podría disminuir por la mala gestión y explotación inadecuada de los ecosistemas páramos, afectando de manera directa a la parte media y baja de la SRG. Los problemas citados pueden incrementarse ante la falta de una rápida respuesta por parte de las autoridades competentes y de la sociedad local, afectando a los aspectos: ambientales, económicos y sociales.

La presión de la expansión poblacional genera un desequilibrio en la sostenibilidad del recurso hídrico. Como se evidenció a nivel internacional con un estudio realizado en las cuencas de la Región de los Andes en Venezuela durante el año 2011, donde se demostró que las dinámicas de desarrollo económico y territorial, los procesos tecnológicos y el elevado crecimiento urbano, afectan al equilibrio ecológico, cambios en las categorías de uso y cobertura de suelo, la calidad y disponibilidad del agua para futuras generaciones. Como resultado del análisis se determinó que las cuencas hidrográficas afectadas fueron (Masparro, Uribande, Chama y Motatán) en donde existe mayor densidad poblacional, demostrando que la mala gestión del agua causará problemas en la disponibilidad del recurso tanto en cantidad como calidad, bajo las presiones de su uso (Pulido, 2011).

A nivel local se realizó un estudio sobre el crecimiento demográfico en la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas, Ecuador, durante el año 2015, donde, se comprobó que el aumento de la población genera diferentes actividades económicas, principalmente en el área industrial, y

agroindustrial, que conjuntamente con las descargas urbanas y parroquiales vierten sus aguas servidas directamente a la cuenca del Río Guayas y Esmeraldas. Estas descargas al no ser regularizadas por las entidades locales provocan alteraciones en el paisaje y en las propiedades naturales de los cursos del agua (Calero, 2015).

La modelización hidrológica de una cuenca es necesaria e indispensable para conocer los cambios y repercusiones que se han suscitado en la zona con la interacción del ser humano, es por ello, que el presente proyecto investigativo generó un modelamiento de la subcuenca que permitió determinar si se han ocasionado fluctuaciones de caudal.

5. OBJETIVOS

5.1. General

- Modelar con SWAT y GR2M para la Subcuenca del Río Guayllabamba

5.2. Específicos

- Realizar un análisis exploratorio de datos
- Calibrar y validar los modelos hidrológicos en la subcuenca
- Determinar el modelo con el mejor ajuste de simulación

6. ACTIVIDADES Y SISTEMA DE TAREAS EN RELACIÓN A LOS OBJETIVOS PLANTEADOS

Objetivo 1	Actividad (tareas)	Resultado de la actividad	Descripción de la actividad (técnicas e instrumentos)
Realizar un análisis exploratorio de datos	<ul style="list-style-type: none"> - Procesamiento de información espacial, meteorológica e hidrométrica de la SRG. - Delimitación de la SRG. 	Base de datos de entrada para los modelos.	<p>Técnica: Análisis de documentos.</p> <p>Instrumento: Registros meteorológicos. Registros hidrométricos. Información espacial.</p> <p>Herramientas: Hydraccess Oudin et. al Regresión lineal Media mensual</p>
Objetivo 2	Actividad (tareas)	Resultado de la actividad	Descripción de la actividad (técnicas e instrumentos)
Calibrar y validar los modelos hidrológicos en la subcuenca	<p>GR2M:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Determinación de los periodos de modelamiento - Modelamiento lluvia-escorrentía <p>SWAT:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Delimitación de las unidades hidrológicas de respuesta (HRUs) - Caracterización de las HRUs. - Simulación del modelo semidistribuido 	Simulación de caudales del periodo 1982- 2013	<p>Instrumentos: Base de datos de entrada Información espacial</p> <p>Programas: ARCGIS SWAT GR2M</p>
Objetivo 3	Actividad (tareas)	Resultado de la actividad	Descripción de la actividad (técnicas e instrumentos)
Determinar el modelo con el mejor ajuste de simulación	<ul style="list-style-type: none"> - Determinación de los índices de eficiencia 	Selección del mejor modelo en base a los índices de eficiencia.	Simulación de caudales del periodo 1982-2013 de los modelos GR2M y SWAT

7. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICA

7.1. Ciclo Hidrológico

Conjunto de etapas naturales que atraviesa el agua secuencialmente, desde la atmósfera hasta retornar a la tierra. El ciclo hidrológico está conformado por los siguientes componentes: precipitación, evaporación, escorrentía, almacenamiento, condensación, transpiración e intercepción (Ordóñez, 2011).

7.1.1. Condensación

Es el cambio de estado que sufre el agua, de vapor a líquido debido al enfriamiento, además libera energía de calor latente hacia el medio ambiente (Ordóñez, 2011).

7.1.2. Infiltración

Es el ingreso de agua a través del suelo, mientras más infiltración la tierra se hace más húmeda. Este proceso se calcula como una diferencia entre la cantidad de precipitación y la cantidad de escorrentía superficial. Un método que modela directamente la infiltración es el: “Método de infiltración de Green & Ampt” (Uribe, 2010).

7.1.3. Precipitación

Se denomina precipitación a las aguas meteóricas que descienden en forma líquida (agua) y en forma sólida (granizo o nieve), formando las corrientes de agua superficiales y profundas (Segerer & Villodas, 2006). Se requiere tres condiciones en la atmósfera para que la humedad se transforme a precipitación:

- Estado de saturación por enfriamiento debido al ascenso de las masas de aire.
- Cambio de estado de vapor a líquido o sólido.
- Crecimiento de las gotas o cristales de hielo que forman las nubes, aglomerándose y así permitiendo su caída por su propio peso.

Las dos primeras fases forman solo las nubes y para la formación de la precipitación, deben existir núcleos de condensación de polvos atmosféricos o cristales de sales (Fattorelle & Fernandez, 2011).

7.1.4. Evaporación

Proceso que transforma el agua líquida en gas, a través del calentamiento solar. Para esta transformación se requiere que la humedad de la atmósfera sea menor que la superficie de evaporación (Ordóñez, 2011).

Juncosa y Padilla (2009a) afirma que la evaporación empieza cuando se genera la precipitación y al llegar a la superficie del suelo. Las fuentes de agua evaporada son: agua interceptada por las plantas, en las capas superficiales del suelo, de escurrimiento, embalsada y de la nieve.

7.1.5. Transpiración

Es el proceso de evaporación que realizan las plantas; las raíces son encargadas de recoger cantidades de agua para los procesos fisiológicos y lo restante o innecesario es desechado a través de las hojas (Ordóñez, 2011).

7.1.6. Evapotranspiración

Es una suma entre la evaporación y la transpiración. El agua sufre un cambio de estado: líquida a gas, que puede provenir directamente desde la superficie del suelo o de las plantas, todo este proceso se denomina como evapotranspiración (Juncosa & Padilla, 2009a). La fórmula de Oudin et. al (2005) para el cálculo de la evapotranspiración es la siguiente:

$$PE = \frac{R_e}{\lambda \rho_w} \frac{T_a + 5}{100} \text{ (m/s)}$$

Donde:

R_e : Radiación extraterrestre, depende de la latitud y el día juliano. ($J/m^2/s$)

T_{α} : Temperatura media mensual. ($^{\circ}\text{C}$)

λ : Flujo de calor latente. ($2.45 \cdot 10^6 \text{ J/kg}$)

ρ_w : Densidad del agua. (1000 kg/m^3)

7.1.7. Escorrentía

Es una parte del total de la precipitación sobre un área, que cuando los suelos se saturan se generan corrientes de agua que se desplazan por suelo y subsuelo hasta llegar a alimentar a un cauce (Juncosa & Padilla, 2009b). La escorrentía está formada por varios tipos:

- Escorrentía Superficial
- Escorrentía Sub-superficial
- Escorrentía Subterránea

7.1.7.1. Escorrentía Superficial

Es la precipitación que corre por la superficie del terreno a través de la gravedad hasta llegar a un punto de desagüe. La escorrentía superficial ocurre cuando se saturan los suelos, entonces se forma una capa delgada de agua que se mueve por efecto de la gravedad y puede ser frenada por las irregularidades del suelo y la vegetación (Juncosa & Padilla, 2009b).

7.1.7.2. Escorrentía Sub-superficial

De acuerdo con Juncosa y Padilla (2009b), afirma que la escorrentía sub-superficial: Es el agua de precipitación que, habiéndose infiltrado en el suelo, se mueve sub-horizontalmente por los horizontes superiores para reaparecer súbitamente al aire libre como manantial e incorporarse a microsurcos superficiales que la conducirán a la red de drenaje.

7.1.7.3. Escorrentía Subterránea

Juncosa y Padilla (2009b), además manifiesta que: esta precipitación se infiltra hasta llegar al nivel freático (nivel del suelo y rocas donde están permanentemente saturados por agua), finalmente, desembocando a una red de drenaje, esta escorrentía es la más lenta de todas y la superficial es la más rápida en unidades de: m/h.

A parte de las tres formas referidas, la escorrentía de un curso de agua está además constituida por la precipitación que cae directamente sobre su superficie de nivel, fracción que en la mayor parte de los casos reviste importancia muy escasa en relación con las otras aportaciones (Juncosa & Padilla, 2009b).

7.2. Balance hídrico

Consiste en aplicar el principio de la conservación de masa al conjunto de una cuenca o a una parte de ella definida por unas determinadas condiciones de contorno. Durante un periodo de tiempo en el que se realiza el balance, la diferencia entre el total de entradas y el total de las salidas debe ser igual a la variación en el almacenamiento (Juncosa & Padilla, 2009c).

7.3. Cuenca hidrográfica

Territorio o área geográfica delimitada por un parteaguas o divisorias de aguas en el cual escurre el agua de las precipitaciones, desembocando en un punto en común como son ríos, lagos o mares. Posee ecosistemas terrestres y ecosistemas acuáticos (Ordóñez, 2011).

Según Ospina y Mancipe (2016), las cuencas hidrográficas poseen tres partes las cuales son:

- **Cuenca alta:** Zona donde nace el río, desplazándose por la presencia de una gran pendiente hasta que el agua desemboque.
- **Cuenca media:** Zona de equilibrio entre el material sólido que ingresa y el material que sale por medio de la corriente.

- **Cuenca baja:** Zona llamada cono de deyección en el cual se deposita todo el material que desciende de la zona alta.

7.3.1. Subcuenca

Es el conjunto de microcuencas (corrientes, ríos, lagos) que drenan en su totalidad a un solo cauce determinado con caudal fluctuante pero permanente (Ordóñez, 2011).

7.3.2. Microcuenca

Es el área donde su drenaje desemboca en el cauce principal en una subcuenca (Ordóñez, 2011).

7.3.3. Sistema de drenaje

El sistema de drenaje de una cuenca son las rugosidades en el terreno, que tienen como función reunir los caudales de las precipitaciones y escurrimientos permanentes, transportando dichos caudales hacia un cauce principal o una corriente más grande, como una laguna, un río o el mar (Sánchez, García, & Palma, 2003).

7.4. Parámetros morfométricos de una cuenca

Los parámetros morfométricos proveen una descripción física espacial y geométrica del terreno de la cuenca y sus características ambientales, de esta manera permitiendo la comparación con otras cuencas (Gaspari et al., 2012).

La morfometría de una cuenca en función de los eventos climáticos, ofrece una relación entre el aprovechamiento hídrico y la esorrentía generada como respuesta, es decir, es el comportamiento del caudal que recorre una cuenca (Gaspari et al., 2012).

7.4.1. Parámetros asociados a la forma de la cuenca

La forma de una cuenca influye en la velocidad de los escurrimientos o escorrentía superficial. El comportamiento hidrológico difiere cuando la forma de la superficie de una cuenca es igual pero la forma es diferente (Cardona, 2013).

Según Apacla (2010), los parámetros de la forma son los siguientes:

- **Área (A):** Proyección horizontal delimitada por la divisoria de aguas y la superficie de drenaje que dirige la escorrentía a un punto en común o cauce.
- **Longitud (L):** Es la distancia entre la zona baja y la zona alta de la cuenca, en donde el contorno de la cuenca es atravesada por el río principal.
- **Perímetro (P):** Llamada también longitud de la línea de divorcio de la hoya, permite determinar la forma de la cuenca, al relacionarlo con el área de la misma.
- **Ancho (B):** Es la relación entre el área y la longitud de la cuenca.

7.4.2. Parámetros de Relieve

a) Altura y elevación

Determina la oferta hídrica y el movimiento del caudal en la cuenca, dependiendo de las características fisiográficas como el clima, el suelo, la vegetación, entre otras (Cardona, 2013).

Cardona (2013) menciona a continuación los elementos derivados de la elevación de la cuenca:

- **Cota mayor de la cuenca (CM):** Es la altura a la que se encuentra la divisoria de aguas, medida en metros sobre el nivel del mar (msnm).

- **Cota menor de la cuenca (Cm):** Es la altura en donde el agua desemboca en el cauce, medida en metros sobre el nivel del mar (msnm).

b) Topografía

Es una ciencia que se encarga de determinar las posiciones relativas o absolutas de los puntos sobre la tierra, también es importante recalcar que, estudia los métodos y procedimientos necesarios para la medición sobre el terreno y la representación gráfica a cierta escala (Alcántara, 2014).

c) Pendiente del terreno

Representa el grado de inclinación del terreno, siendo el ángulo de inclinación con respecto a la horizontal. Utilizando la función tangente para obtener la pendiente (Mendieta & Valencia, 2005).

d) Pendiente de la corriente principal

Expresa el perfil de la cuenca principal y se en grados o en porcentaje. Precisa la velocidad de escorrentía superficial del cauce, es decir, a > pendiente, > velocidad del caudal (Aristizabal & Jaramillo, 2013).

e) Pendiente media de la cuenca

Para el estudio de una cuenca, dicha pendiente interviene en el tiempo de concentración de un punto específico del cauce, mediante la velocidad obtenida y la erosión producida. (Apcalla, 2010). Representa las trayectorias de escorrentía en las laderas en dirección al cauce principal y se mide en porcentaje o m/m. La pendiente media de la cuenca, determina la velocidad y el tiempo que tarda la escorrentía en llegar a los diferentes causes que forman la red de drenaje de la cuenca (Aristizabal & Jaramillo, 2013). Para determinar la pendiente media se utiliza la siguiente ecuación:

$$S = \frac{\text{Cota máxima (m)} - \text{Cota mínima (m)}}{\text{Longitud (m)}}$$

7.5. Propiedades características de una cuenca

7.5.1. Suelo

El suelo se origina de la desintegración mecánica o la descomposición química de las rocas, específicamente de la roca madre. Además, el suelo dependiendo de su origen y composición se clasifica para su uso apropiado, es de gran importancia tener presente la clasificación y estratificación del suelo en cualquier obra ingenieril debido a que de este depende el futuro funcionamiento, duración y seguridad de la misma (Ospina & Mancipe, 2016).

7.5.1.1. Tipo de suelo

“El tamaño de las partículas minerales que forman el suelo determina sus propiedades físicas textura, estructura, porosidad y el color” (Organización de las Naciones Unidas de Alimentación y Agricultura, 2017).

Además, la FAO, (2017) manifiesta que: Según su textura podemos distinguir tres tipos de suelos: arena, arcilla y limo:

- La arena es la que existe en los diversos ríos. Los suelos arenosos, como son más sueltos son fáciles de trabajar, pero tienen pocas reservas de nutrientes aprovechables por las plantas.
- Los suelos limosos tienen gránulos de tamaño intermedio son fértiles y fáciles de trabajar. Forman terrones fáciles de desagregar cuando están secos.
- La arcilla son partículas muy finas y forman barro cuando están saturadas de agua. Los suelos arcillosos son pesados, no drenan ni se desecan fácilmente y contienen buenas reservas de nutrientes. Son fértiles, pero difíciles de trabajar cuando están muy secos.

7.5.1.2. Uso de Suelo

El suelo por ser un recurso único posee diferentes finalidades en su mayoría son para actividades antrópicas. Los entes municipales son los encargados de determinar el uso específico que se dará

al suelo, a nivel provincial, regional y nacional (Centro Aragonés de Tecnologías para la Educación, 2016).

Según CATEDU (2016) los principales usos del suelo son los siguientes:

- Uso agrícola.
- Uso ganadero.
- Uso forestal.
- Uso minero, energético e hídrico.
- Uso industrial.
- Uso de servicios de transporte y comunicación.
- Uso urbano y rural.
- Uso recreativo, cultural, científico y de protección ambiental.
- Terrenos sin presencia antrópica como: desiertos, torrentes, cumbres, montañas, etc.

7.6. Modelación de cuencas

La modelación de cuencas tiene como finalidad entender la relación del sistema-cuenca con su respectiva respuesta. Cada cuenca se diferencia de otras, por el clima, por los parámetros morfométricos, por la topografía, etc., particularidades que condicionan la estructura de la calidad de los modelos con relación a la realidad de los sistemas de las cuencas, en función de su capacidad de predicción, por ende se determina que no existe un modelo que refleje la realidad en su totalidad (Cabrera, 2012b).

7.6.1. Modelo Hidrológico

Es una herramienta física o matemática que describe las fases del ciclo hidrológico y un sistema real complejo o cuenca hidrográfica, denominado prototipo. Representa la transición de la precipitación y la evapotranspiración en escurrimiento superficial y sub-superficial (Ocampo & Vélez, 2014). El modelo hidrológico es importante debido a las siguientes características:

- Simulación y predicción de fenómenos físicos en corto, mediano y largo plazo.
- Relaciones causa-efecto, sin cambios en los sistemas físicos reales.
- Capacidad de simulación en función del tiempo y espacio.
- Requerimiento de entradas y salidas del sistema.
- Aplicable en cuencas de cualquier tamaño.
- Variaciones espaciales temporales y variaciones espaciales de precipitación.
- El resultado es un hidrograma de escurrimiento.

7.6.1.1. Clasificación de modelos hidrológicos.

Orduña (2007), clasifica los modelos hidrológicos según las siguientes representaciones espaciales:

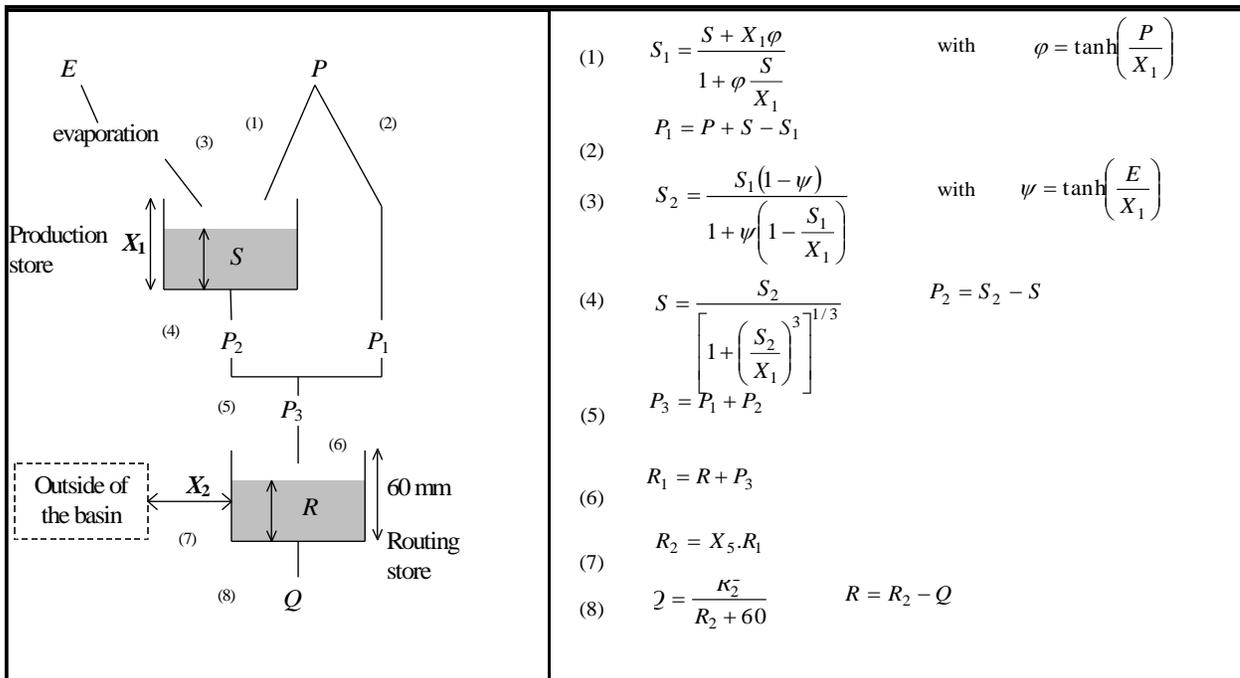
- **Modelos agregados:** Modelo de distribución espacial uniforme de precipitación, representando una cuenca homogénea. Este modelo simula el proceso hidrológico de manera global y a lo largo de un suceso, los parámetros de precipitación media y los sub-modelos que conforman dichos modelos. Se utiliza en cuencas de áreas pequeñas.
- **Modelos semidistribuidos:** Modelo que divide a la cuenca en varias subcuencas con su respectiva precipitación y parámetros correspondientes. Este modelo admite la variabilidad entre la precipitación y los parámetros de los sub-modelos que lo conforman. Se utiliza este modelo para cuencas de mayores áreas debido al cambio del tipo y uso de suelo a lo largo de la cuenca.
- **Modelos distribuidos:** Permite la división de una cuenca en celdas mediante la variabilidad espacial de la precipitación y de otros parámetros, para la simulación de los procesos hidrológicos en cada celda y transmitiendo su efecto a la celda siguiente. El modelo distribuido representa de mejor manera la realidad del balance hídrico de una cuenca a comparación de los dos modelos mencionados anteriormente.

7.6.3. Modelo agregado GR2M

Modelo global de tiempo mensual desarrollado por CEMAGREF (Centro de Investigación Agrícola e Ingeniería Ambiental, Francia), tiene como función la reconstrucción de caudales mediante la precipitación y evapotranspiración calculada en base a la temperatura (Mouelhi, 2003) citado por (A. Alcántara, Montalvo, Mejía, & Ingol, 2014).

El modelo consta de dos parámetros: X_1 (máxima capacidad de almacenamiento del reservorio en mm) y X_2 (coeficiente de intercambio de agua subterránea, sin unidades). Utilizando dos funciones: de producción alrededor de un reservorio suelo, y de transferencia regida por el reservorio de agua gravitacional, el mismo que determina el caudal que puede liberarse. La arquitectura y las fórmulas del modelo (Figura 1). Representando los procesos hidrológicos para la transformación precipitación – escorrentía, utilizados en el modelo (Arévalo & Obando, 2011).

Figura 1: Arquitectura modelos GR2M de Mouelhi (2003)



Fuente: CEMAGREF (www.cemagref.fr).

Donde:

P: Precipitación media de la cuenca

P₁: Escorrentía superficial

P₂: Percolación profunda

P₃: Precipitación efectiva, suma de P₁ + P₂

E: Evapotranspiración actual

S: Almacenamiento del reservorio suelo al inicio del periodo de análisis

R: Almacenamiento del reservorio de agua gravitacional al inicio del periodo de análisis, con una capacidad máxima de 60mm

Q: Caudal de salida de la cuenca

7.6.4. Modelo semidistribuido SWAT

“SWAT es un modelo continuo de tiempo, es decir un modelo conformado a largo plazo, que no está diseñado para simular un solo-acontecimiento de flujo detallado” (Uribe, 2010).

Herramienta creada por el Dr. Jeff Arnold en el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos con la Universidad de Texas. Su función es la predicción del impacto ocasionado por el manejo del recurso suelo sobre el recurso agua y con relación a la generación de sedimentos dentro de la cuenca hidrográfica. Divide el área de estudio en subcuencas, de modo que al realizar los cálculos sea con una exactitud mayor. El modelo determina la entrada, salida y almacenamiento del agua, como se expresa en el balance hídrico (Figura 2) (Proaño, Gavilanes, Valenzuela, & Cisneros, 2006). Basado en la siguiente ecuación:

$$SW_t = SW + \sum (R_i - Q_i - ET_i - P_i - QR_i)$$

Donde:

SW_t: Cantidad final de contenido de agua en el suelo (mm)

SW: Cantidad inicial de contenido de agua en el suelo (mm)

t: Tiempo en días

R_i: Cantidad de lluvia caída en el período de análisis (mm)

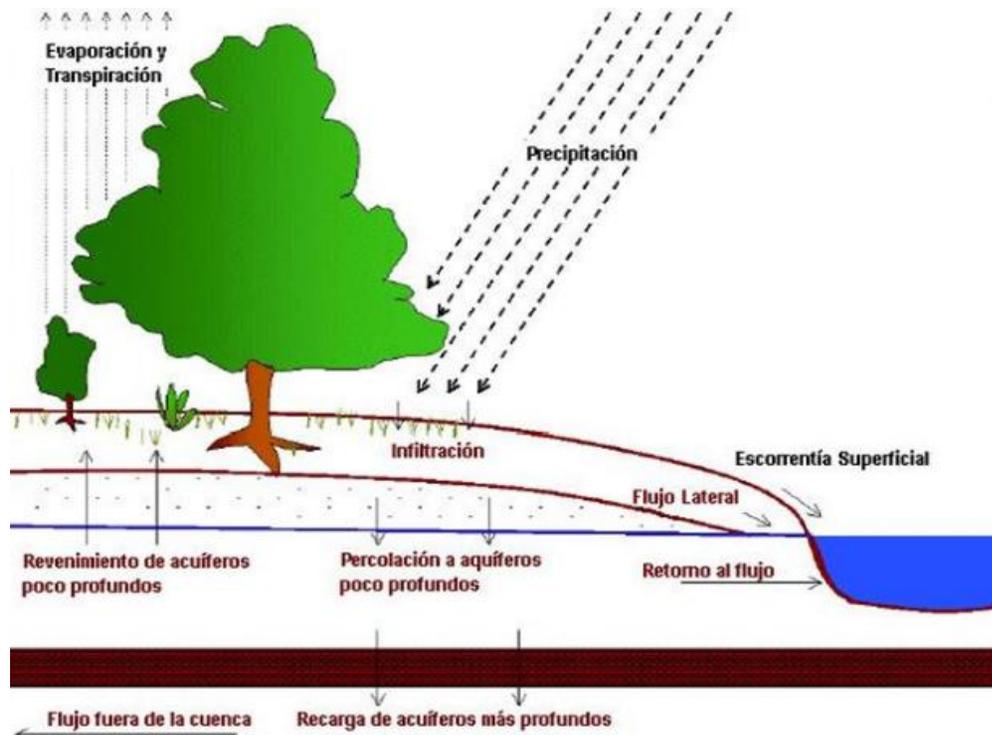
Q_i : Cantidad de escorrentía (mm)

ET_i : Evapotranspiración (mm)

P_i : Percolación (mm)

QR_i : Flujo de retorno (mm)

Figura 2: Esquema de procesos hidrológicos simulados en SWAT



Fuente: SWAT (2012)

Según (Castillo, Ortega, & Cisneros, 2009) el proceso a realizar en SWAT es el siguiente:

- Ingreso de Información: Es el ingreso de toda la información demandada por SWAT, es muy importante que los archivos estén con el mismo formato requeridos por SWAT para su compatibilidad.
- Manejo y procesamiento de la información: En esta etapa se realiza los diferentes procesos como: cruces de información, cálculos matemáticos, generación de mapas temáticos, etc., generando las HRUs, que nos permitirá obtener los resultados requeridos por el investigador.

- Presentación de los resultados: Es la presentación de los resultados obtenidos del modelo hidrológico de manera simple, sencilla y entendible para todos.

Datos de entrada

Según Castillo, Ortega y Cisneros los datos e información de ingreso al modelo son los siguiente

- Pendiente de la cuenca
- Topografía
- Tipo y uso de suelo
- Unidad de respuesta hidrológica

Datos meteorológicos:

- Radiación Solar
- Precipitación
- Temperatura
- Humedad relativa
- Velocidad del viento

7.6.4.1. Unidad de respuesta hidrológica

Son áreas que han sido divididas a partir de una cuenca, poseen homogeneidad en términos de respuesta hidrológica y características geo-climáticas. Es decir, son áreas dispersas que no están conectadas entre sí, pero poseen características similares como: pendiente, elevación, uso de suelo, tipo de suelo, cubierta vegetal, etc. (Cabrera, 2012c).

7.7. Métodos de completación de datos

7.7.1. Método de vector regional

Es un modelo que analiza la información pluviométrica de una región, en la que puede: criticar, homogenizar y completar los datos de precipitación. Este método elabora una estación ficticia de

todas las estaciones de la zona (Precipitación media extendida), con la cual se comparan todas las estaciones, pudiendo solucionar el problema de estaciones con mayor intensidad de lluvia que otras. El vector regional para poder realizar todo este proceso se fundamenta en asumir que toda la zona es homogénea, es decir que, los totales pluviométricos anuales son pseudo-proporcionales, con pequeñas variaciones cada año en la repartición de las precipitaciones dentro de la zona (Córdova, 2015).

7.7.2. Regresión Lineal

El análisis de regresión lineal es una técnica estadística que estudia la relación entre variables, a través de una línea recta y su ecuación matemática que describan la relación entre dos variables. La regresión lineal permite estimar el valor de la variable aleatoria (dependiente – de respuesta) a partir de que se conoce el valor de una variable asociada (independiente – de predicción). Este método puede ser aplicado para predecir el desempeño en áreas en donde no son deseables o no es posible lograr experimentos controlados, pronosticar o predecir el valor futuro de una variable a partir del valor de la otra (Salazar, 2016), su fórmula es:

$$y = a + bx$$

Donde:

y= valor estimado o pronosticado de la variable dependiente

x= valor que asume la variable independiente

a= punto en el que la recta corta al eje “y”

b=pendiente de la recta

7.7.3. Media Mensual

La media aritmética es el valor obtenido al sumar todos los datos y dividir el resultado entre el número total de datos (Sangaku, 2018). Su fórmula es:

$$\bar{X} = \frac{\sum x}{N}$$

Donde:

\bar{X} = media, promedio

x= valores o datos

N= número total de los valores

7.8. Calibración y Validación de Resultados

7.8.1. Calibración

Proceso en el cual se obtiene los valores óptimos de los parámetros del modelo en estudio, determinando el mejor ajuste entre los valores observados y pronosticados (Mena, 2010) citado por (A. Alcántara et al., 2014). Además, es necesario primero determinar la “función objetivo” para evaluar la bondad del ajuste del modelo, es decir, estimar la incertidumbre entre los valores observados y pronosticados (Cabrera, 2012a). Este proceso puede realizarse de dos formas:

- a. Prueba y error: Ajuste manual de los parámetros bajo la opinión del investigador. Es subjetivo, el más usado.
- b. Automática: Usa técnicas numéricas complejas, con el inconveniente en la compensación de errores y en los valores mínimos locales. Es objetivo.

7.8.2. Validación

Proceso de verificación de la calidad de los ajustes en la etapa de calibración y manifestando que el modelo puede predecir valores de periodos fuera de la fase de calibración en un área determinada, considerando que las condiciones futuras serán similares a las actuales. La validación es permitida cuando la precisión y la capacidad predictiva presentan errores dentro de lo aceptable (Cabrera, 2012d).

7.8.3. Criterios de evaluación

7.8.3.1. Coeficiente de Nash y Sutcliffe

El coeficiente de Nash y Sutcliffe cuantifica la eficiencia entre un modelo simulado y uno observado. Los valores van de mayores a menores que 1. Mientras más se acerque a 1, significa que la bondad de ajuste o calibración es perfecta. Si el valor es 0, significa que la media de los datos observados es igual al modelo y si el valor es inferior a cero, el modelo no sirve (Cabrera, 2012a). La fórmula es:

$$NS = 1 - \left[\frac{\sum n (Y_{obs} - Y_{sim})^2}{\sum n (Y_{obs} - Y_{med})^2} \right]$$

Donde:

Y_{obs} : constituye el valor observado (s).

Y_{med} : es la media de los datos observados.

Y_{sim} : compone el valor simulado (s).

n: número total de observaciones

Los valores referenciales del criterio de Nash se presentan en la siguiente Tabla:

Tabla 3: Valores referenciales del Criterio de Nash

NS	AJUSTE
<0,2	Insuficiente
0,2 – 0,4	Satisfactorio
0,4- 0,6	Bueno
0,6 – 0,8	Muy bueno
>0,8	Excelente

Fuente: Manho (2012)

7.8.3.2. Coeficiente de determinación R^2

El coeficiente de determinación es el cuadrado del coeficiente de correlación de Pearson. Describe la razón cuadrada entre la covarianza y las desviaciones estándar multiplicadas de los valores observados y pronosticados que pueden ser explicados por el modelo. Es decir, estima la dispersión combinada frente a la dispersión única de los datos observados y pronosticados (Krause, Boyle, & Bäse, 2005).

Interpretación: tiene un rango entre 0 y 1, describiendo qué cantidad de la dispersión observada se explica mediante la predicción. Un valor de 0 significa que no hay correlación, y un valor de 1 significa que la dispersión de la predicción es igual a la de la observación (Krause et al., 2005).

Su fórmula es la siguiente:

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}) (P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right)^2$$

Donde:

O: Valores observados

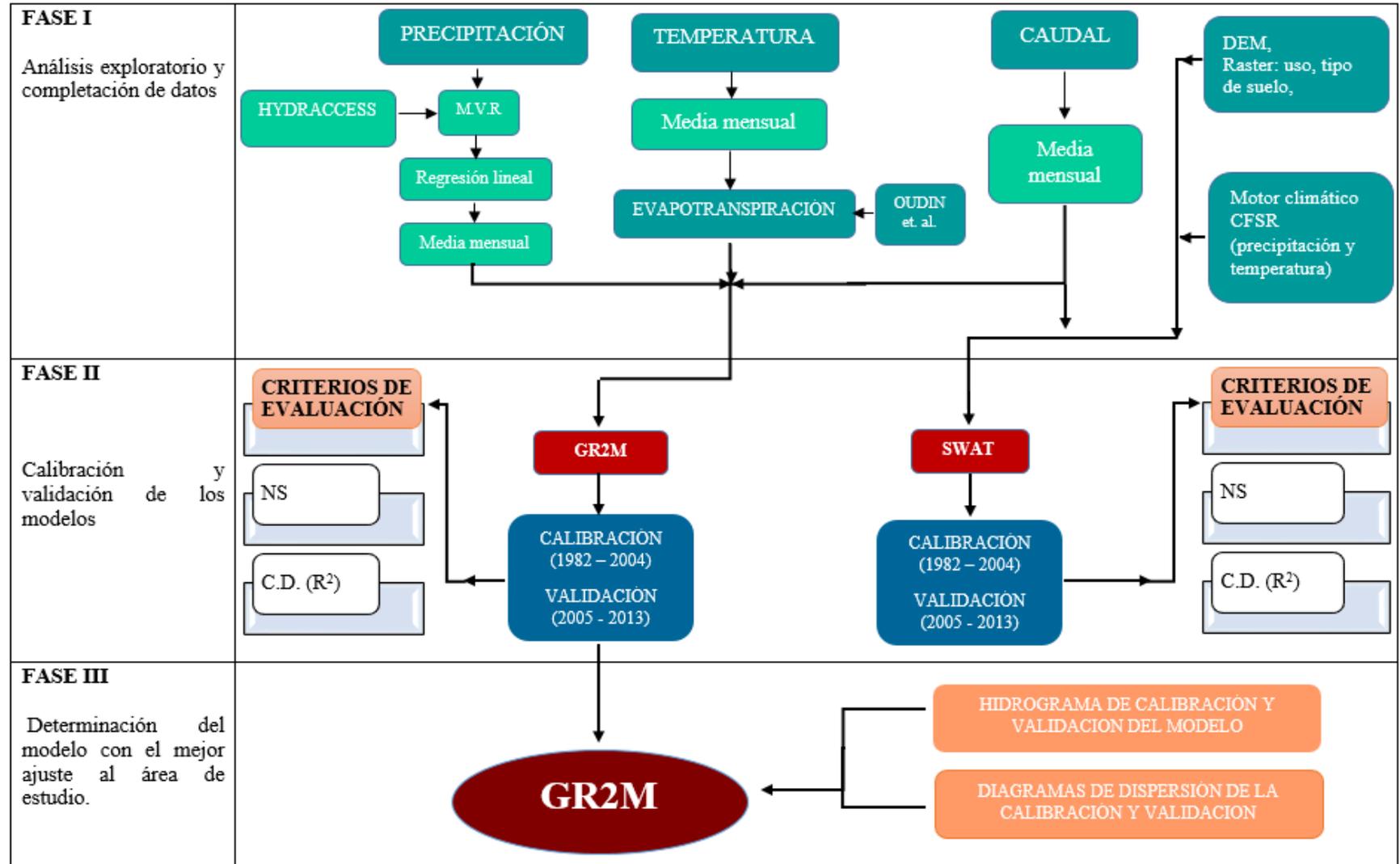
P: Valores pronosticados

8. PREGUNTAS CIENTÍFICAS O HIPÓTESIS

El modelo semidistribuido como SWAT puede modelar eficientemente la subcuenca del Río Guayllabamba en comparación con un modelo agregado GR2M.

9. METODOLOGÍA

Figura 3: Fases del proyecto

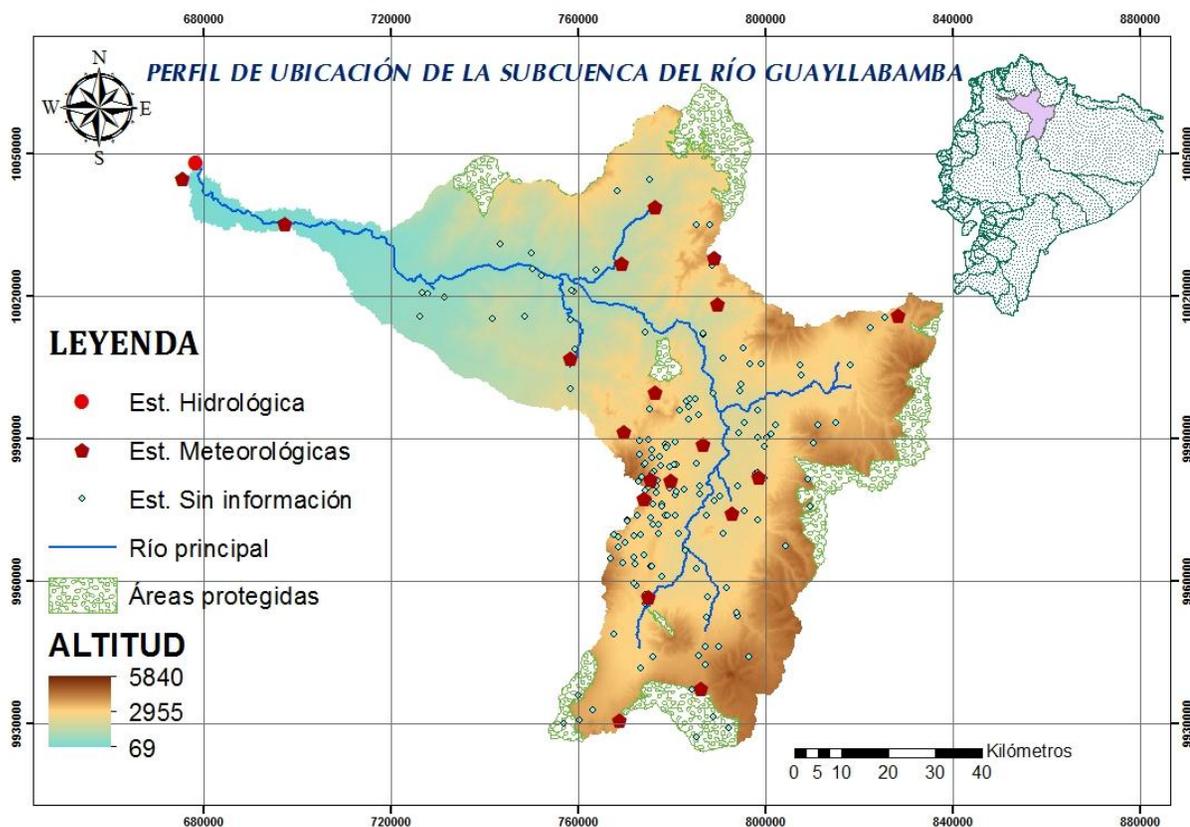


Elaborado por: Los autores (2018)

9.1. Área de estudio

La SRG posee un área de 8223.44 km², ubicada entre las coordenadas UTM: Norte 18430-36870 y Este: 722600-750430. La subcuenca forma parte de la Demarcación hidrográfica del Esmeraldas, vertiente del Pacífico, que se extiende entre las provincias de: Pichincha (mayoritariamente), Imbabura y Esmeraldas. La subcuenca alta se encuentra atravesado por la Cordillera de los Andes y la baja por las llanuras costeras, presentando variaciones en la altitud desde los 69-5840 m.s.n.m. Además, la zona de estudio está intersectada por áreas naturales protegidas como: Reserva Geobotánica Pulumahua, Refugio de Vida Silvestre Pasochoa, Reserva Ecológica Ilinizas, Parque Nacional Cotopaxi, Reserva Ecológica Antisana, Parque Nacional Cayambe Coca, Reserva Ecológica Cotacahi Cayapas y Área Nacional de Recreación El Boliche (Figura 4).

Figura 4: Ubicación de la Subcuenca del Río Guayllabamba



Fuente: ArcGIS 10.2.2

Elaborado por: Los autores (2018)

9.2. Recolección de datos hidrometeorológicos

Se recolectó información meteorológica de 190 estaciones que se obtuvo del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI). Las estaciones seleccionadas fueron 19 meteorológicas (Tabla 4) y 1 hidrológica (H0170), por presentar la mayor cantidad de registros mensuales dentro del periodo 1982 – 2013.

Tabla 4: Características de las estaciones del Ecuador, periodo 1982 al 2013

Código	Estación	Tipo	Ubicación		Altitud (m)	Estado
			Latitud	Longitud		
H0170* *	Guayllabamba AJ Blanco	LM*, AU*	0,43522	-7939614	90	Activa
M0001* **	Inguincho	CP*	0,258333	-78,400833	3140	Activa
M0002	La Tola	AU*, CP*	-0,229444	-78,366667	2480	Activa
M0023	Olmedo-Pichincha	CO*	0,148056	-78,047778	3120	Activa
M0024	Quito Inamhi- Innaquito	AU, CP	-0,166667	-78,483333	2789	Activa
M0113	Uyumbicho	CP	-0,388333	-78,525278	2740	Activa
M0120	Cotopaxi-Clirsen – IEE	CO	-0,623333	-78,581389	3510	Activa
M0318	Apuela-Intag	PV*	0,355000	-78,513611	1620	Activa
M0326	Selva Alegre- Imbabura	PV	0,246389	-78,576944	1800	Activa
M0335	La Chorrera	PV	-0,201667	-78,535000	3165	Activa
M0337	San Jose De Minas	PV	0,168889	-78,393056	2440	Activa
M0339	Nanegalito	PV	0,066667	-78,676389	1580	Activa
M0345	Calderon	PV	-0,098333	-78,420833	2645	Activa
M0346	Yaruqui Inamhi	PV	-0,159722	-78,315278	2600	Activa

M0357	Canal 10 Tv.	PV	-0,164722	-78,522500	3780	Activa
M0358	Calacali Inamhi	PV	0,001389	-78,512500	2810	Activa
M0361	Nono	PV	-0,073333	-78,572778	2710	Activa
M0364	Loreto Pedregal	PV	-0,561389	-78,426389	3620	Activa
M0855	Malimpia	PV	0,408611	-79,421111	30	Inactiva
M1181	Buenos Aires- HCPP	CO	0,322500	-79,222778	200	Inactiva

*CP = Climatológica Principal, CO = Climatológica Ordinaria, PV = Pluviométrica, AU= Automática, LM= Limnimétrica;

H= Estación hidrológica; * M= Estación meteorológica

Fuente: INAMHI

Elaborado por: Los autores (2018).

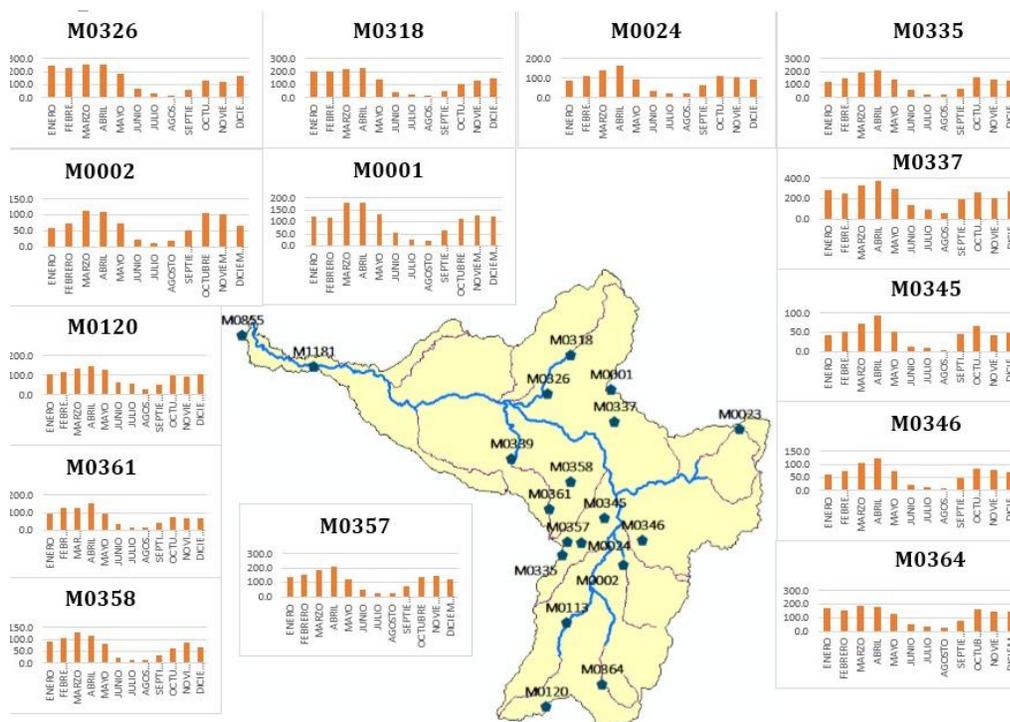
9.3. Completación de datos de las estaciones meteorológicas

La estación M1181 contiene los datos de precipitación de la estación meteorológica M0026, debido a que no se encontró una estación representativa con datos completos sobre la cuenca baja, por lo que al encontrarse a una similar altitud: 200 m y 319 m, respectivamente, se procedió al traslado de datos. De igual manera la estación 855 posee los datos de la estación meteorológica M0154 con altitudes similares de 30 m y 55 m respectivamente.

9.3.1. Precipitación de la subcuenca

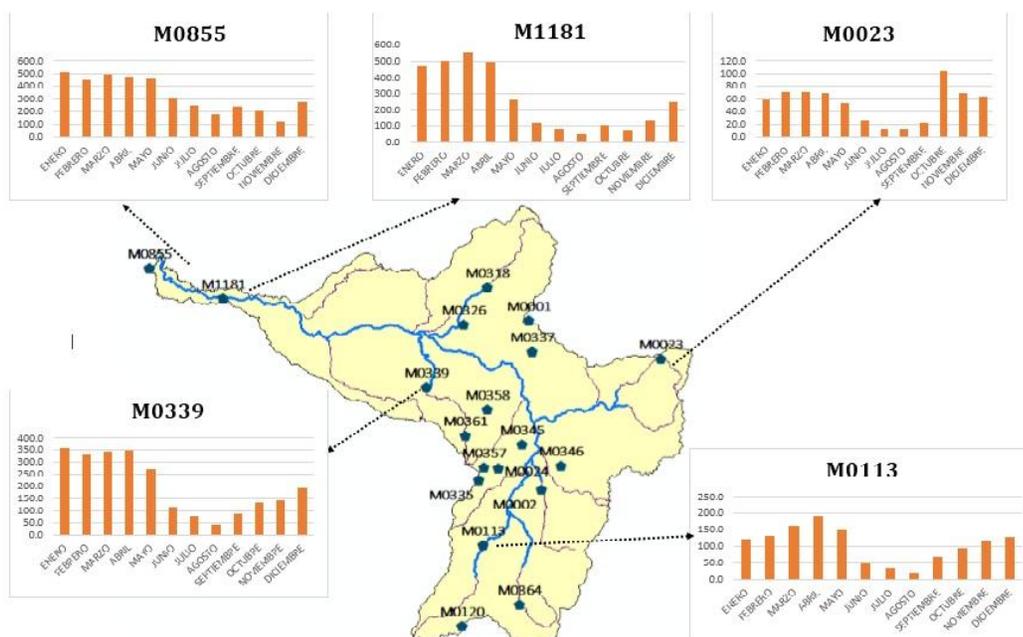
La precipitación en la SRG tiene una distribución bimodal, donde, la cuenca baja posee mayor intensidad de precipitaciones en la temporada de lluvia (diciembre-mayo) que en la cuenca alta (Figura 5 y Figura 6).

Figura 5: Precipitación media mensual para el período 1982-2013 (mm/mes) de las catorce estaciones pluviométricas de la subcuenca alta del Río Guayllabamba



Elaborado por: Los autores (2018)

Figura 6: Precipitación media mensual para el período 1982-2013 (mm/mes) de las cuatro estaciones pluviométricas de la subcuenca baja del Río Guayllabamba



Elaborado por: Los autores (2018)

9.3.1.1. Método del vector regional para completación de datos

Se completó datos de precipitación de 19 estaciones por el método del Vector Regional (MVR) (Y. Brunet Moret, G. Hiez), mediante la herramienta Hydraccess (Vauchel, 2005). EL MVR formó zonas homogéneas de precipitación, correspondiente a la subcuenca baja y alta del río Guayllabamba. En la zona alta se ubican M0001, M0002, M0024, M0120, M0318, M0326, M0335, M0337, M0345, M0346, M0357, M0358, M0361, M0364, con una precipitación media de 105.3 mm año⁻¹ y a una altura desde los 1620-3780 msnm. Las estaciones restantes: M0023, M0113, M0339, M0855, M1181 distribuidas desde los 30-3120 msnm y una precipitación media de 190.8 mm año⁻¹, se encuentra en la subcuenca baja del río Guayllabamba (Anexo 3).

El MVR eliminó el período noviembre de 1986 – julio, noviembre, diciembre de 1988 – febrero de 1989 – febrero de 1990 – octubre de 2003 de cuatro estaciones (M0023, M0113, M0855, M1181). Las representaciones gráficas mensuales de la zona baja y alta de la SRG son los resultados del MVR (Anexo 4 y Anexo 5).

9.3.1.2. Regresión lineal para completación de datos de las estaciones de la cuenca baja

Para conocer el grado de correlación entre las estaciones se determinó el coeficiente de correlación de Pearson, encontrándose una correlación de 0.76 entre la estación M0339 y la M1181 (Tabla 5).

Tabla 5: Coeficiente de correlación entre las estaciones M0023 – M0113 – M0339 – M0855 – M1181 con datos faltantes

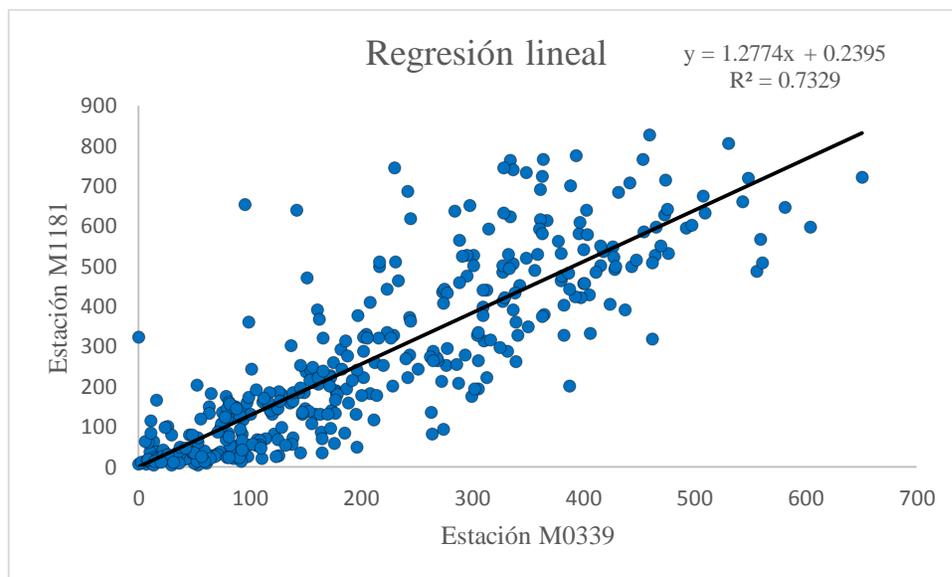
	M0023 (mm)	M0113 (mm)	M0339 (mm)	M0855 (mm)	M1181 (mm)
M0023 (mm)	1				
M0113 (mm)	0.53	1			
M0339 (mm)	0.55	0.63	1		
M0855 (mm)	0.08	0.25	0.57	1	
M1181 (mm)	0.26	0.40	0.76	0.59	1

Elaborado: Los autores, EXCEL (2018)

Se realizó la regresión lineal considerando los datos iniciales de la estación M0339, completando solo los datos faltantes con los datos que se obtuvo de Hydraccess. En el caso de la estación M1181, los datos utilizados fue los obtenidos del MVR (Hydraccess), con siete datos faltantes.

El resultado fue un diagrama de dispersión con un coeficiente de determinación mayor que 0,7 (Figura 7).

Figura 7: Diagrama de dispersión entre la estación M0339 y M1181



Elaborado por: Los autores, EXCEL (2018)

La ecuación se aplicó de la siguiente manera: para determinar el valor y (datos para la estación M1181), se reemplazó en el valor x , con los datos de la estación M0339. Con estos resultados, se completó los siete datos faltantes de la estación mencionada anteriormente.

9.3.1.3. Media mensual de la precipitación de la subcuenca

Para las estaciones M0023 – M0113 – M0855, se realizó una media mensual en EXCEL considerando que la cantidad de datos faltantes correspondan al 20%. Para lo cual, primero se utilizó la función MES, cambiando la fecha establecida (01/01/1982 00:00 - 31/12/2013 00:00) al mes correspondiente 1 (enero) hasta 12 (diciembre). Una vez realizado esta función, se calculó el promedio de precipitación para cada mes (Tabla 6).

Tabla 6: Valores de la media mensual de precipitación, a) estación M0023, b) estación M0113, c) estación M0855

a)		b)		c)	
Mes	Promedio de Precipitación	Mes	Promedio de Precipitación	Mes	Promedio de Precipitación
1	59.30	1	120.18	1	512.74
2	70.84	2	134.26	2	462.08
3	70.44	3	161.26	3	492.72
4	71.67	4	198.87	4	481.67
5	54.34	5	150.04	5	453.04
6	25.68	6	49.19	6	312.32
7	13.73	7	36.46	7	243.30
8	13.52	8	21.85	8	177.47
9	22.48	9	70.07	9	242.62
10	104.22	10	93.92	10	201.81
11	70.63	11	116.46	11	117.42
12	64.41	12	130.31	12	276.73
Total general	53.20	Total general	106.87	Total general	332.3

Elaborado por: Los autores, EXCEL (2018).

Con los promedios mensuales obtenidos se procedió a completar los meses faltantes de los datos de cada una de las estaciones.

9.3.2. Temperatura de la Subcuenca

Para los datos de temperatura se contó con siete estaciones meteorológicas: M0001 – M0002 – M0023 – M0024 – M0120 – M0855 – M1181. Con una cantidad de datos incompletos menores o iguales al 20%.

9.3.2.1. Media mensual para la completación de datos de temperatura

Para completar los datos faltantes de las estaciones, se realizó una media mensual en EXCEL. Para lo cual, primero se utilizó la función MES, cambiando la fecha establecida (01/01/1982 00:00 - 31/12/2013 00:00) al mes correspondiente 1 (enero) hasta 12 (diciembre). Realizado esta función, mediante una tabla dinámica se calculó el promedio de precipitación para cada mes (Tabla 7).

Tabla 7: Valores de la media mensual de temperatura, a) estación M0001, b) estación M0002, c) estación M0023, d) estación M0024, e) estación M0120, f) estación M0855, g) estación M1181

a)		b)		c)		d)	
Mes	Promedio de Temperatura						
1	10.2	1	15.44	1	9.37	1	14.29
2	10.1	2	15.54	2	10.12	2	14.58
3	10.3	3	15.46	3	9.80	3	14.37
4	10.2	4	15.48	4	10.10	4	14.55
5	10.4	5	15.59	5	9.59	5	14.68
6	10.0	6	15.49	6	9.96	6	15.02
7	9.8	7	15.26	7	9.18	7	14.94
8	10.0	8	15.54	8	9.55	8	15.23
9	10.1	9	15.56	9	9.41	9	15.19
10	10.1	10	15.36	10	9.90	10	14.54
11	9.8	11	15.30	11	10.00	11	14.28
12	10.1	12	15.49	12	10.41	12	14.24
Total	10.1	Total	15.46	Total	9.78	Total	14.66

e)		f)		g)	
Mes	Promedio de Temperatura	Mes	Promedio de Temperatura	Mes	Promedio de Temperatura
1	8.23	1	22.48	1	24.01
2	8.30	2	23.25	2	24.10
3	8.29	3	22.05	3	24.86
4	8.13	4	22.73	4	25.01
5	8.03	5	22.97	5	24.45
6	7.98	6	23.11	6	23.34
7	7.75	7	23.08	7	22.50
8	7.96	8	23.18	8	22.51
9	7.47	9	23.40	9	22.96
10	7.90	10	22.65	10	23.20
11	7.82	11	22.65	11	23.30
12	8.21	12	22.80	12	23.78
Total	8.01	Total	22.86	Total	23.67

Elaborado por: Los autores, EXCEL (2018).

Con los promedios mensuales obtenidos se procedió a completar los meses faltantes de los datos de cada una de las estaciones.

9.3.3. Caudal de la Subcuenca del Río Guayllabamba

Los datos de caudal para el estudio se tomaron de la estación hidrométrica H0170, contando con los datos incompletos, por ende, se utilizó la media mensual como método de completación de datos.

9.3.3.1. Media mensual para completación de datos de caudal.

El procedimiento para sacar la media mensual fue el mismo realizado para las estaciones meteorológicas en cuanto a datos de temperatura y precipitación (Tabla 8).

Tabla 8: Valores de la media mensual de caudal, estación H0170

Caudal	Promedio de Caudal
1	401.13
2	493.63
3	507.68
4	507.53
5	449.00
6	294.83
7	204.82
8	164.10
9	166.70
10	182.64
11	213.11
12	270.71
Total general	323.37

Elaborado por: Los autores, EXCEL (2018).

Una vez completado los datos faltantes en la información de caudal, se verificó que el método utilizado fuera el adecuado. Se realizó un análisis de datos: estadística descriptiva (Tabla 9).

Se comprobó estadísticamente que la media mensual fue aceptable para completar los datos de la estación H0170.

Tabla 9: Análisis de datos: estadística descriptiva de la estación H0170 con datos completos

Caudal	
Media	321.324496
Error típico	8.43991247
Mediana	294.829091
Moda	204.821381
Desviación estándar	165.387832
Varianza de la muestra	27353.135
Curtosis	-0.86480873
Coefficiente de asimetría	0.453749
Rango	687.935
Mínimo	46.077
Máximo	734.012
Suma	123388.607
Cuenta	384

Elaborado por: Los autores, EXCEL (2018).

9.4. Cálculo de la evapotranspiración (EP) de la subcuenca

La evapotranspiración se determinó mediante una hoja de cálculo basada en el modelo propuesto por Oudin et. al (2005). Los datos requeridos fueron latitud en grados decimales (Tabla 10) y temperatura media mensual, iniciando por el mes juliano. Los resultados fueron expresados en mm mensuales, información requerida para el modelo hidrológico GR2M.

Tabla 10: Latitud de las estaciones meteorológicas en la subcuenca del Río Guayllabamba

Estación	Latitud
M0001	0,26
M0002	-0,23
M0023	0,15
M0024	-0,17
M0120	-0,62
M0855	0,41
M1181	0,32

Elaborado por: Los autores (2018).

9.5. Modelamiento con GR2M

Los datos de entrada para el modelo fueron mensuales, precipitación (mm), evapotranspiración (mm) y caudal (m^3/s). Se consideró 32 años de estudio: dos tercios para la calibración (1983-2004) y un tercio para la validación (2005-2013). En la calibración se utilizó el primer año como calentamiento del modelo para contrarrestar los efectos de los primeros cálculos. La eficiencia de los parámetros (X1 y X2) para la calibración y validación fueron evaluados por el coeficiente de Nash-Sutcliffe y el coeficiente de determinación R^2 . Para la optimización de los dos parámetros se utilizó la herramienta SOLVER (Excel).

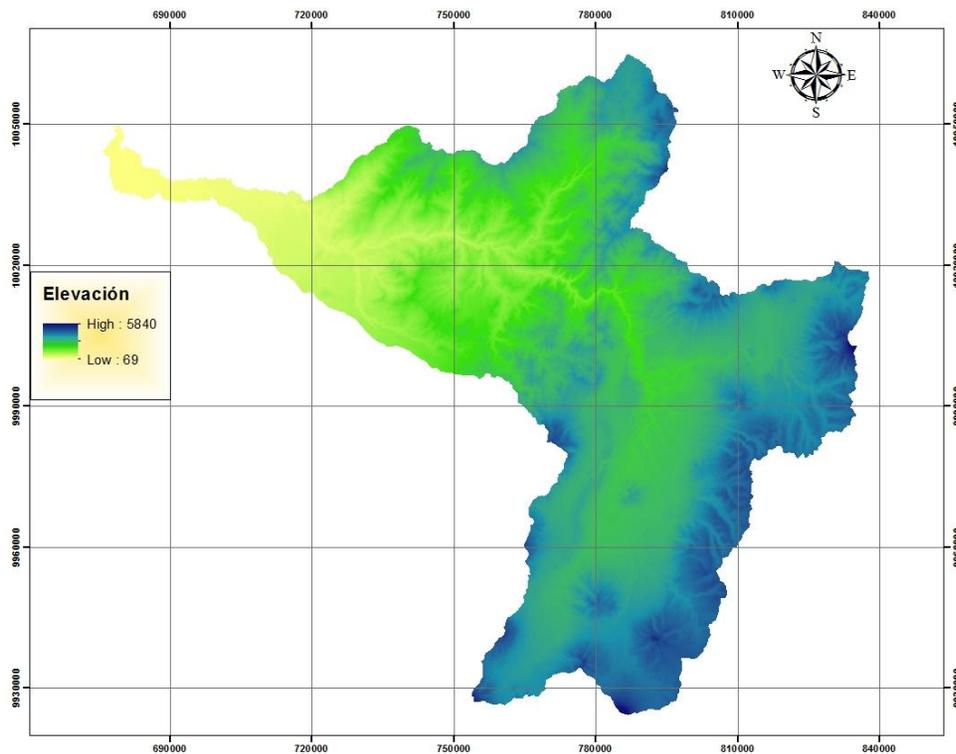
9.6. Modelamiento con SWAT

La información climática diaria de caudal (m^3/s), precipitación (mm) y temperatura ($^{\circ}\text{C}$) para la simulación fueron extraídos del motor climático mundial CFSR_World (1979-2014) correspondiente al período 1982 -2013 (globalweather.tamu.edu). Para la calibración y validación se utilizó los mismos periodos del modelo anterior.

9.6.1. DEM

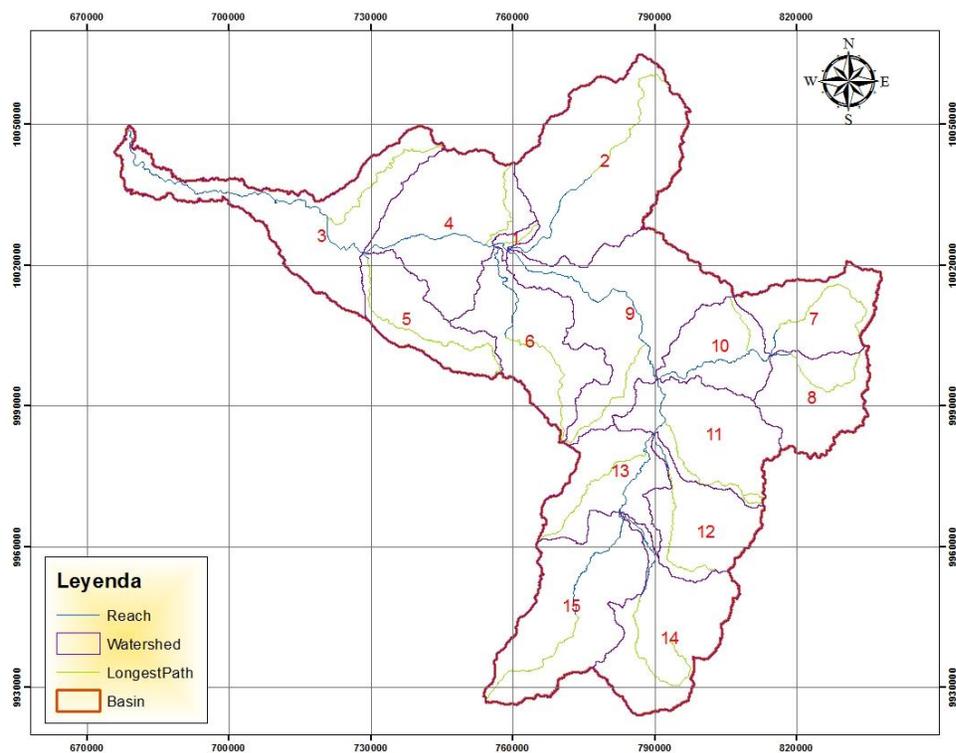
El modelo digital de elevación (DEM), se obtuvo de la siguiente website Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI) (srtm.csi.cgiar.org/) en formato GeoTiff: SRTM 90m digital elevation data versión 4. El DEM permitió definir las propiedades topográficas, su división en 15 microcuencas y el sistema de drenaje de la SRG (Figura 8 y Figura 9).

Figura 8: Delimitación de la Subcuenca del Río Guayllabamba



Fuente: ArcSWAT (2012)

Figura 9: Sistema de drenaje de la Subcuenca del Río Guayllabamba



Fuente: ArcSWAT (2012)

9.6.2. Uso de suelo

El mapa de uso de suelo generado por Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) (www.waterbase.org/download_data.html), en formato tif., con una resolución de 400 m. Se utilizó la clasificación del uso de suelo predeterminada por el modelo SWAT. Para la SRG se definió 14 variables del uso de suelo (Tabla 11, Figura 10).

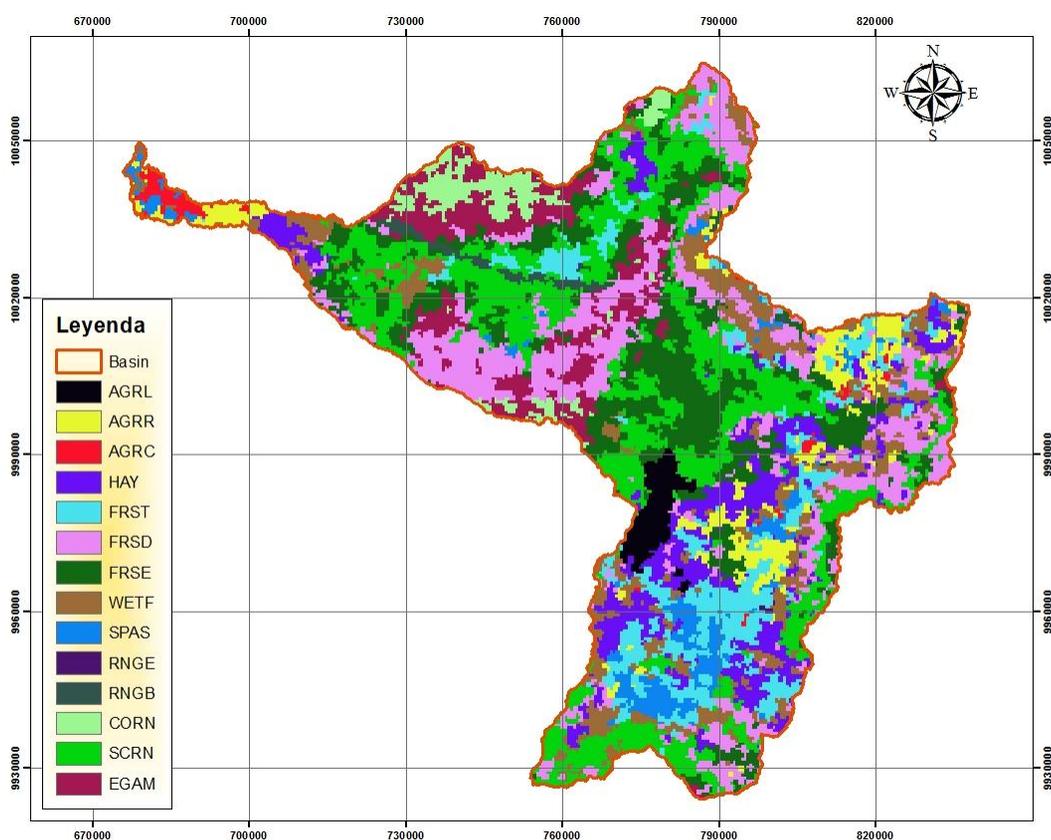
Tabla 11: Descripción de los usos de suelo de la Subcuenca del Río Guayllabamba

Valor	Uso de suelo	Nombre	Valor	Uso de suelo	Nombre
1	AGRL	Tierra agrícola: genérico	10	WETF	Humedales boscosos
2	AGRR	Tierra agrícola: Cultivos de hileras	13	SPAS	Pasto de verano
3	AGRC	Tierra agrícola-Mosaico agropecuario	15	RNGE	Pastizales
5	HAY	Heno	16	RNGB	Matorral albolado
6	FRST	Bosque mixto	19	CORN	Maíz
7	FRSD	Bosque de hoja caduca	21	SCRN	Maíz dulce
8	FRSE	Bosque de hoja verde	22	EGAM	Gamagrass oriental

Fuente: USGS

Elaborado por: Los autores (2018)

Figura 10: Distribución del uso de suelo de la Subcuenca del Río Guayllabamba



Fuente: ArcSWAT (2012)

9.6.3. Tipo de Suelo

El mapa de tipo de suelo elaborado por la FAO -1999, (2003); (www.waterbase.org/download_data.html), en formato tif., con una resolución de 8km. Las 7 variables definidas de tipo de suelo para la SRG (Tabla 12 y Figura 11).

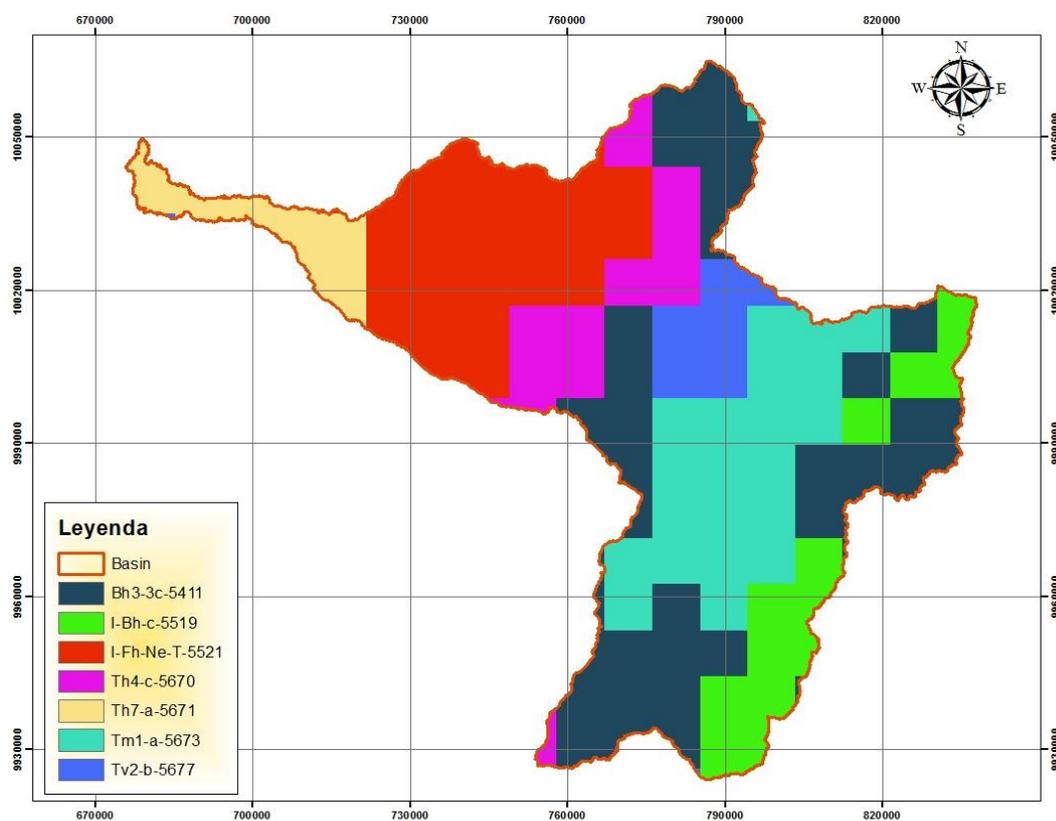
Tabla 12: Descripción de los tipos de suelo de la Subcuenca del Río Guayllabamba

Valor	Tipo de Suelo	Nombre
5411	Bh3-3c	Cambisoles húmicos
5519	I-Bh-c	Litosoles - Cambisoles húmicos
5521	I-Fh-Ne-To-c	Litosoles - Ferrosoles húmicos - Nitosoles éutricos - Andosoles ócricos
5670	Th4-c	Andosoles húmicos
5671	Th7-a	Andosoles húmicos
5673	Tm1-a	Andosoles mólicos
5677	Tv2-b	Andosoles vítricos

Fuente: FAO 1999(2003)

Elaborado por: Los autores (2018)

Figura 11: Distribución del tipo de suelo en la Subcuenca del Río Guayllabamba



Fuente: ArcSWAT (2012)

9.6.4. Pendiente

Los valores de referencia para la clasificación de la pendiente en la SRG fueron tomadas de FAO 1999 (2003) (Tabla 13), definiendo al área de estudio en tres clases (Figura 12).

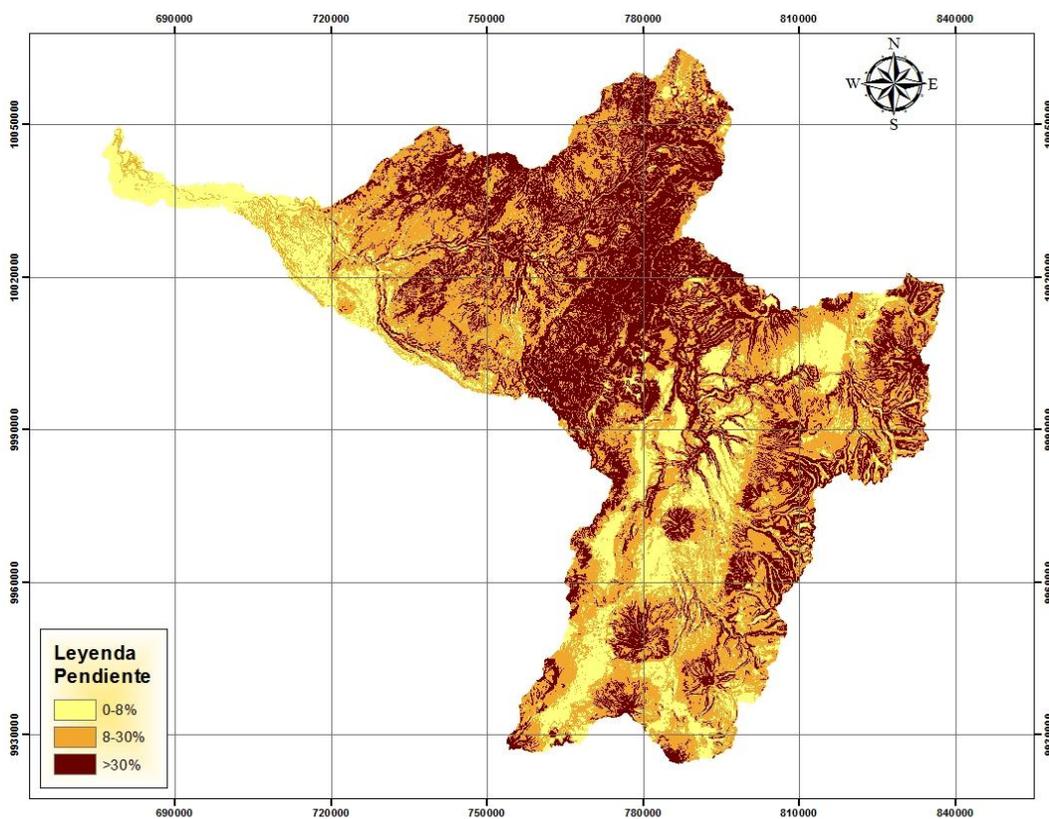
Tabla 13: Descripción de las pendientes de la Subcuenca del Río Guayllabamba

Clase	Descripción	Porcentaje
01	Plano	0 - 8
02	Ondulado	8 - 30
03	Montañoso	30 - >

Fuente: FAO 1999 (2003)

Elaborado: Los autores (2018)

Figura 12: Mapa de pendiente de la Subcuenca del Río Guayllabamba

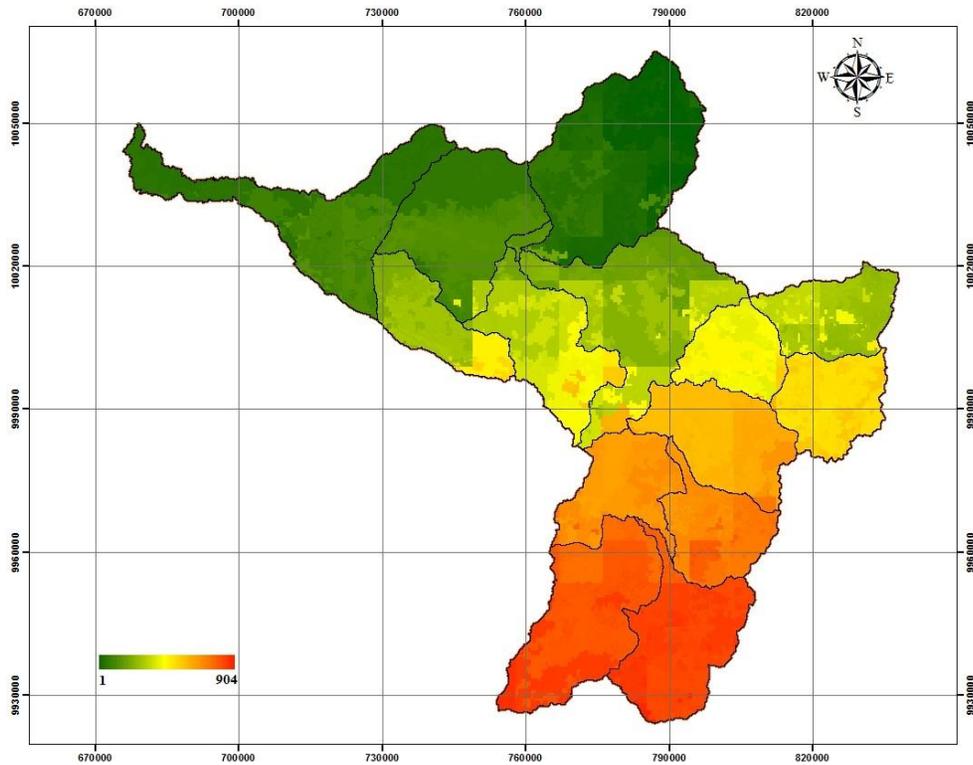


Fuente: ArcSWAT (2012)

9.6.5. Determinación de las HRUs

Las variables de los mapas de pendiente, uso y tipo de suelo fueron reclasificados y superpuestos, creando 904 HRUs para las 15 microcuencas del área de estudio (Figura 13).

Figura 13: Unidades de respuesta hidrológicas de la Subcuenca del Río Guayllabamba



Fuente: ArcSWAT (2012)

La determinación de las HRUs generó áreas con parámetros hidrológicos similares entre sí, convirtiéndolos en unidades homogéneas en términos de respuesta hidrológica y características geo-climáticas, pero que no están conectados entre sí.

9.6.6. Ingreso de los datos meteorológicos

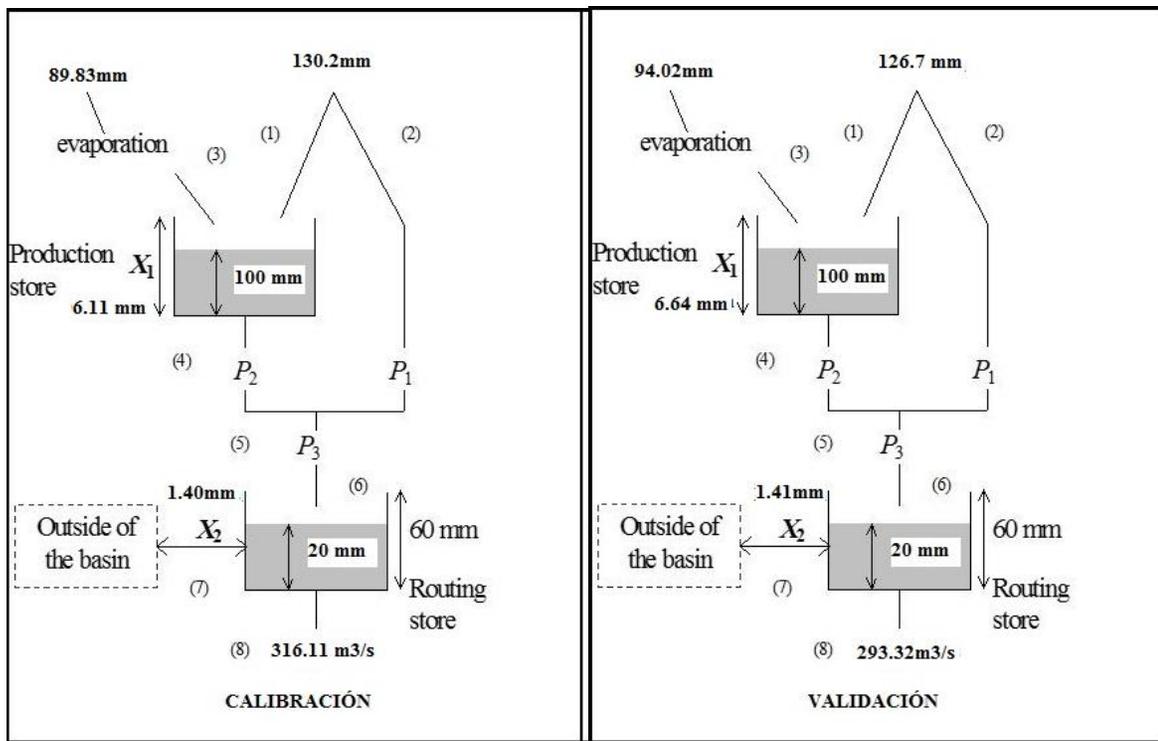
Los datos meteorológicos del motor climático mundial fueron los utilizados para la simulación del caudal, debido a que no se contó con datos de precipitación diaria en la zona de estudio para la simulación.

10. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS:

10.1. Modelo GR2M

Los parámetros optimizados para la calibración fueron: X_1 (capacidad del reservorio-suelo) con 6.11 mm y X_2 (coeficiente de intercambios subterráneos) con un valor de 1.40 (adimensional). Por otra parte, para la validación los valores fueron: $X_1 = 6.64\text{mm}$ y $X_2 = 1.41$ (Figura 14).

Figura 14: Arquitectura del modelo GR2M del período calibración (1982-2004) y validación (2005-2013)



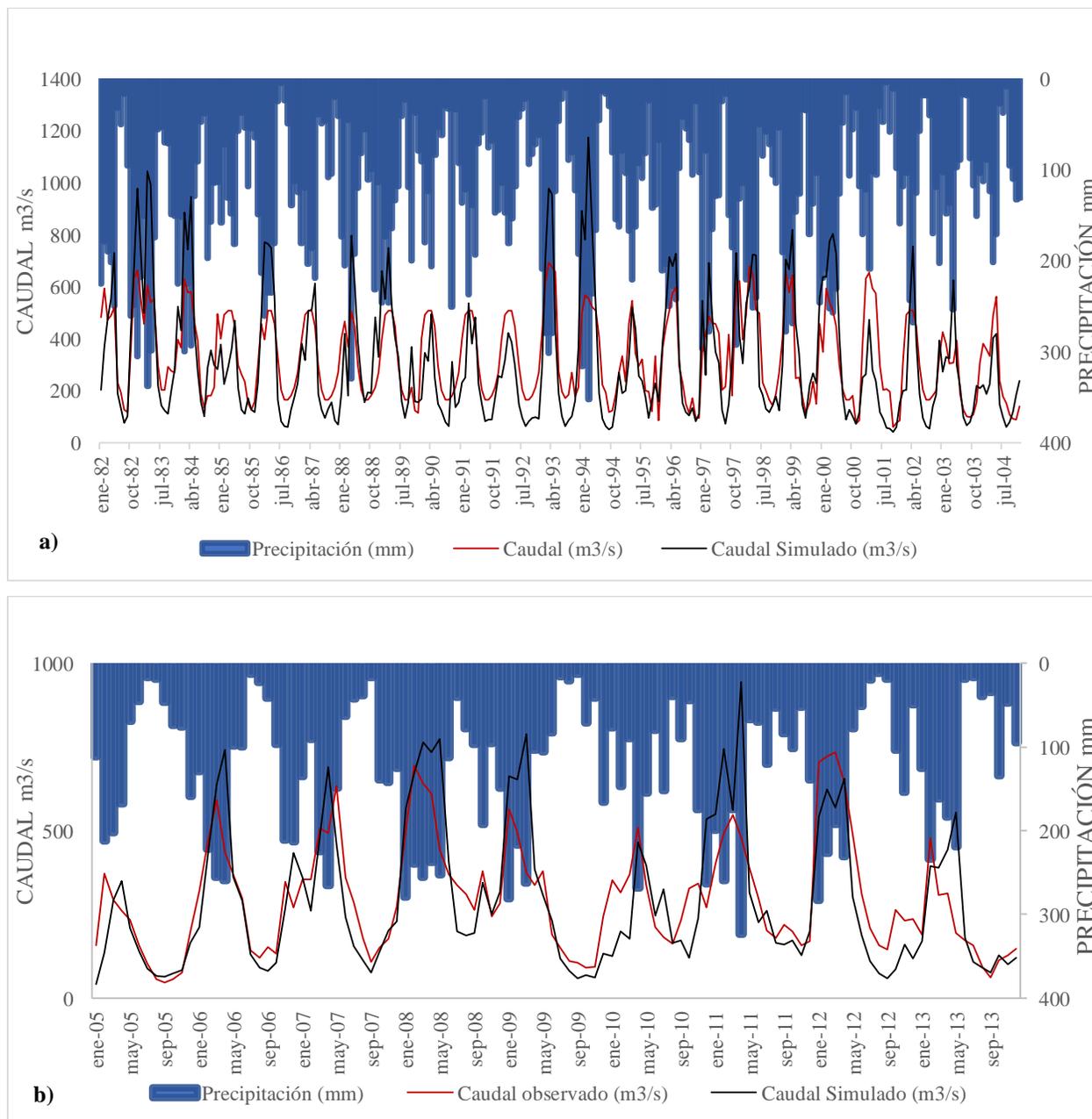
Fuente: GR2M

10.1.1. Calibración y validación

Existe una relación directa entre la precipitación con el caudal, a mayor precipitación mayor caudal. Se considera que los resultados arrojados por el modelo GR2M siguen muy bien el patrón, simulando satisfactoriamente las fluctuaciones de caudal existentes pero con errores de aproximación. Es decir, el modelo sobrestima los meses de avenida y subestima los meses de

estiaje. En la validación, el modelo ajustó acertadamente la simulación del caudal de acuerdo con los datos observados, teniendo inconvenientes con los vértices de igual manera. (Figura 15).

Figura 15: Calibración y validación del modelo GR2M para la Subcuenca del Río Guayllabamba con los valores de precipitación, caudales observados y simulados, a) hidrograma de calibración para el período 1982-2004 y b) hidrograma de validación para el período 2005-2013



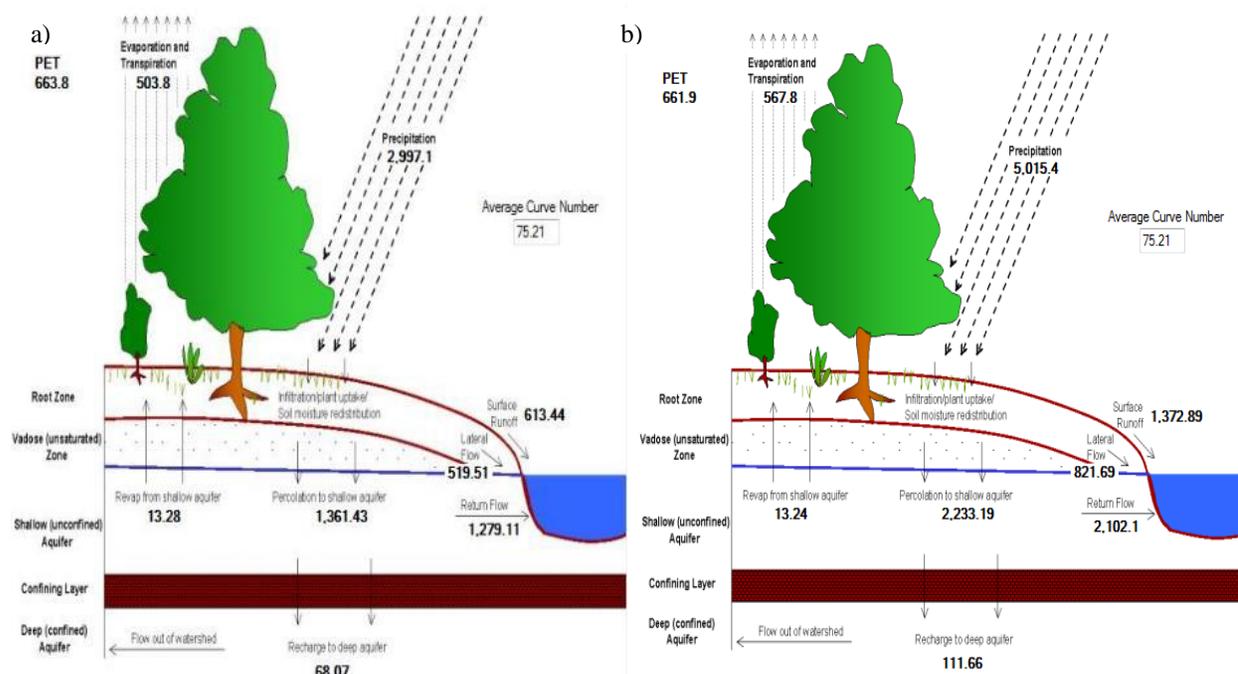
Elaborado por: Los autores (2018)

10.2. Modelo SWAT

En SRG se determinó que el uso de suelo predominante fueron los forestal con un 49.01%, seguido por los cultivos de maíz con un 23.63%. El tipo de suelo predominante fue Bh3-3c-5411 con un 27.27% que pertenece a los cambisoles húmicos, seguido por I-Fh-Ne-T-5521 con un 21.06% que pertenece a los litosoles. El 45.56% corresponde al mayor porcentaje de pendiente en el área de estudio que se encuentra en el rango 8-30% (Anexo 6)

En el período de calibración (1982-2004) la contribución de la precipitación anual es 2997.1mm de los cuales se evapotranspira el 503.8mm. En la SRG el rendimiento hídrico fue 2412.06mm, con el 67% de escorrentía superficial y el 33% de flujo base (flujo de retorno y flujo lateral). Para el período de validación (2005-2013) la contribución de la precipitación anual es 5015.4mm de los cuales se evapotranspira el 567.8mm. En la SRG el rendimiento hídrico fue 4296.68mm, con el 67% de escorrentía superficial y el 33% de flujo base (flujo de retorno y flujo lateral) (Figura 16).

Figura 16: Proceso hidrológico simulado por SWAT. a) Período de calibración (1982-2004) y b) período de validación (2005-2013)

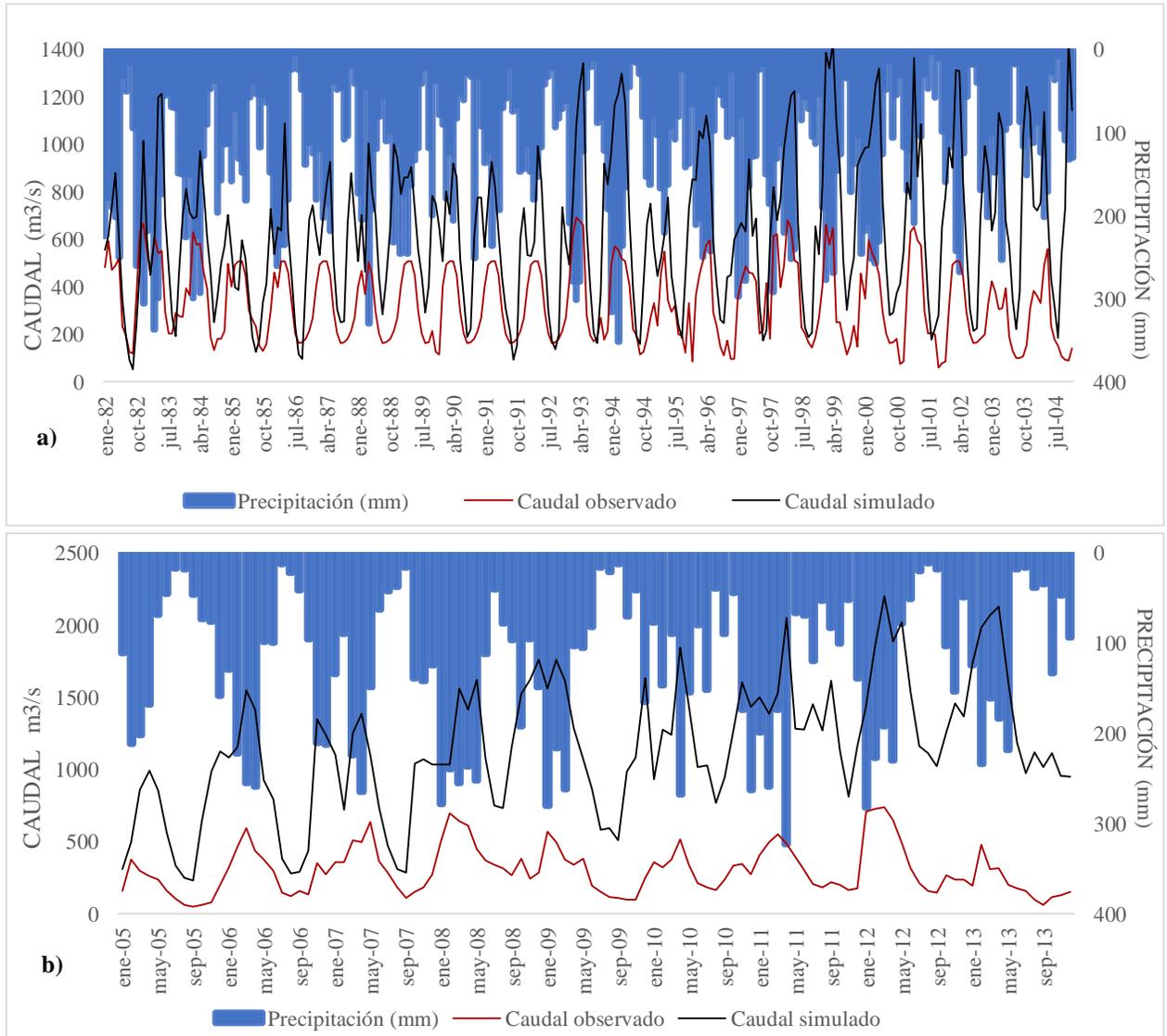


Fuente: ArcSWAT (2012)

10.2.1. Calibración y validación

La simulación del modelo SWAT presenta una respuesta directa, a medida que aumenta la precipitación aumenta el caudal. Tanto para la calibración como la validación el modelo sobreestimó los caudales máximos y mínimos en los períodos de avenidas (diciembre-mayo) y estiajes (junio-noviembre). Demostrando un ajuste insatisfactorio entre los caudales observados y simulados (Figura 17).

Figura 17: Calibración y validación del modelo SWAT para la Subcuenca del Río Guayllabamba con los valores de precipitación, caudales observados y simulados, a) hidrograma de calibración para el período 1982-2004 y b) hidrograma de validación para el período 2005-2013



Elaborado por: Los autores (2018)

10.3. Comparación del desempeño de los modelos GR2M y SWAT

Los parámetros ajustados en la calibración de SWAT fueron 8 y en el modelo GR2M, solo fueron dos los parámetros optimizados (capacidad del reservorio-suelo y el coeficiente de intercambios subterráneos) (Tabla 14).

Tabla 14: Parámetros utilizados para calibración y validación del modelo GR2M y SWAT

Modelo	Parámetro	Calibración	Validación	Descripción
GR2M	X1	6.11	6.64	Máxima capacidad de almacenamiento del reservorio
	X2	1.40	1.41	Coeficiente de intercambio de agua subterránea
SWAT	CH_N2	0.014	0.014	Coeficiente de Manning
	GW_REVAP	0.02	0.02	Coeficiente de revaporización del agua subterránea
	SHALLST	1000	1000	Profundidad inicial del agua en el acuífero superficial [mm]
	DEEPST	2000	2000	Profundidad inicial del agua en el acuífero profundo [mm]
	GW_DELAY	31	31	Retraso del agua subterránea [días]
	GWHT	1	1	Altura inicial del agua subterránea [m]
	GW_SPYLD	0.003	0.003	Rendimiento específico del acuífero superficial [m ³ /m ³]
	ALPHA_BF_D	0.01	0.01	Factor alfa de flujo de base para acuífero profundo [días]

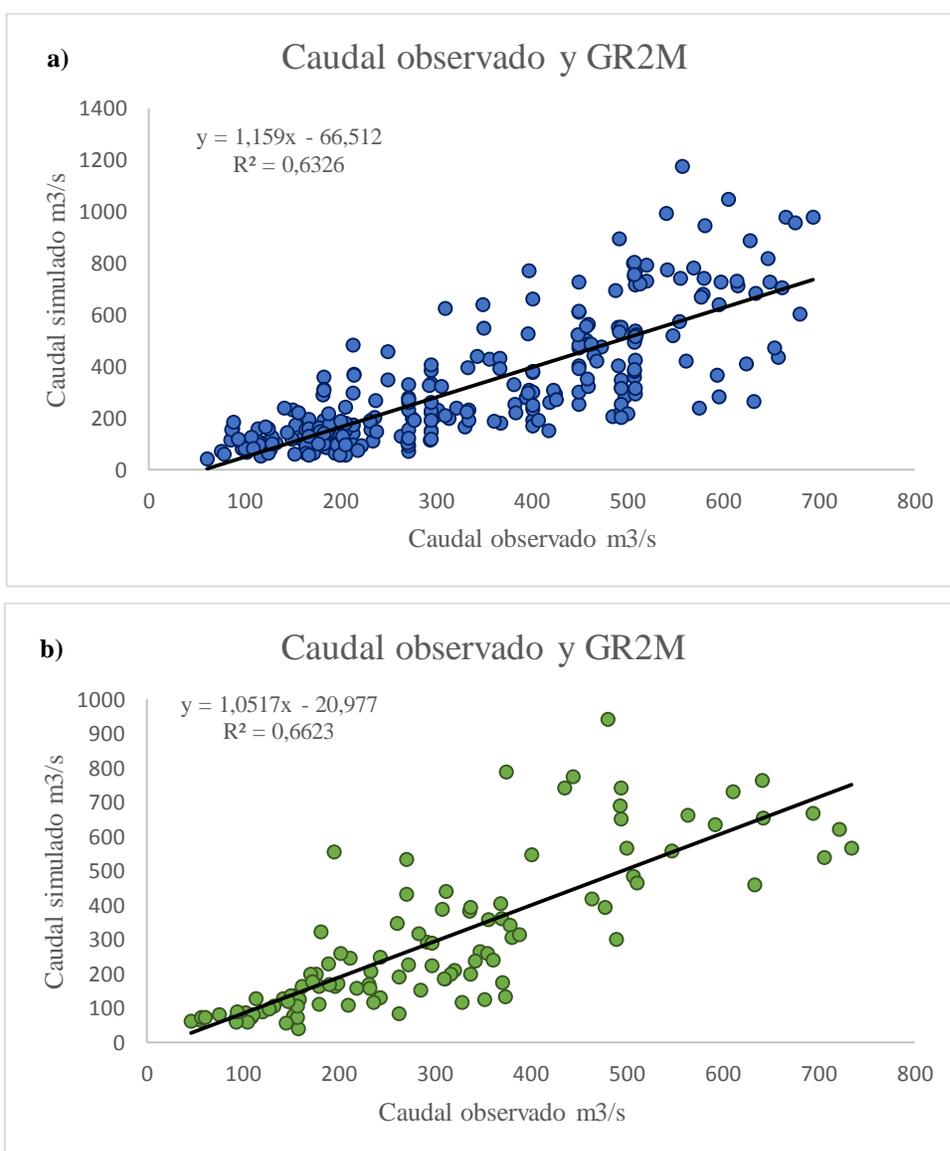
Elaborado por: Los autores (2018)

La Tabla 15 y Figura 20 muestran la capacidad, de los modelos GR2M y SWAT para representar caudales medios mensuales en la SRG; los valores del coeficiente de determinación R^2 son significativos para el modelo GR2M, tanto en la calibración como en la validación, con valores mayores al umbral de 0.60 (Figura 18), e insignificantes para SWAT situándose por debajo del dato referencial (Figura 19). De la misma manera, considerando el coeficiente de Nash – Sutcliffe, en el experimento de calibración y validación con GR2M para el periodo 1982 – 2013 se obtiene

valores mayores que 0.60, situando al modelo en eficiencia como satisfactorio. En cambio, SWAT alcanza valores menores que 0.2, calificándolo como un modelo insuficiente.

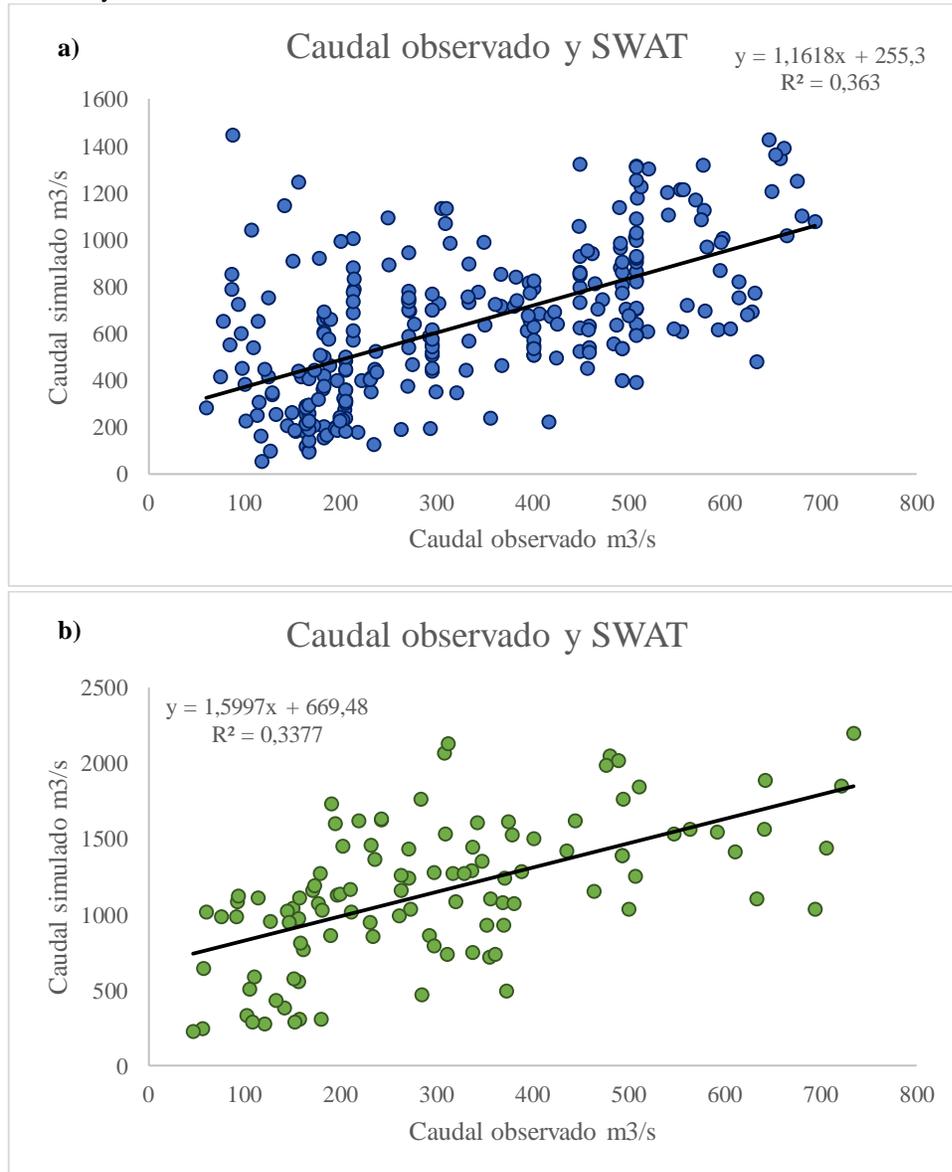
Esto implica que la simulación logra un ajuste óptimo con el modelo GR2M, entre los valores simulados y los observados, tanto para el período de calibración como para la validación, demostrando el buen desempeño del modelo.

Figura 18: Diagrama de dispersión de a) calibración (1983-2004) y b) validación (2005-2013) entre los caudales simulados por GR2M y los caudales observados



Elaborado por: Los autores (2018)

Figura 19: Diagrama de dispersión de a) calibración (1983-2004) y b) validación (2005-2013) entre los caudales simulados por SWAT y los caudales observados



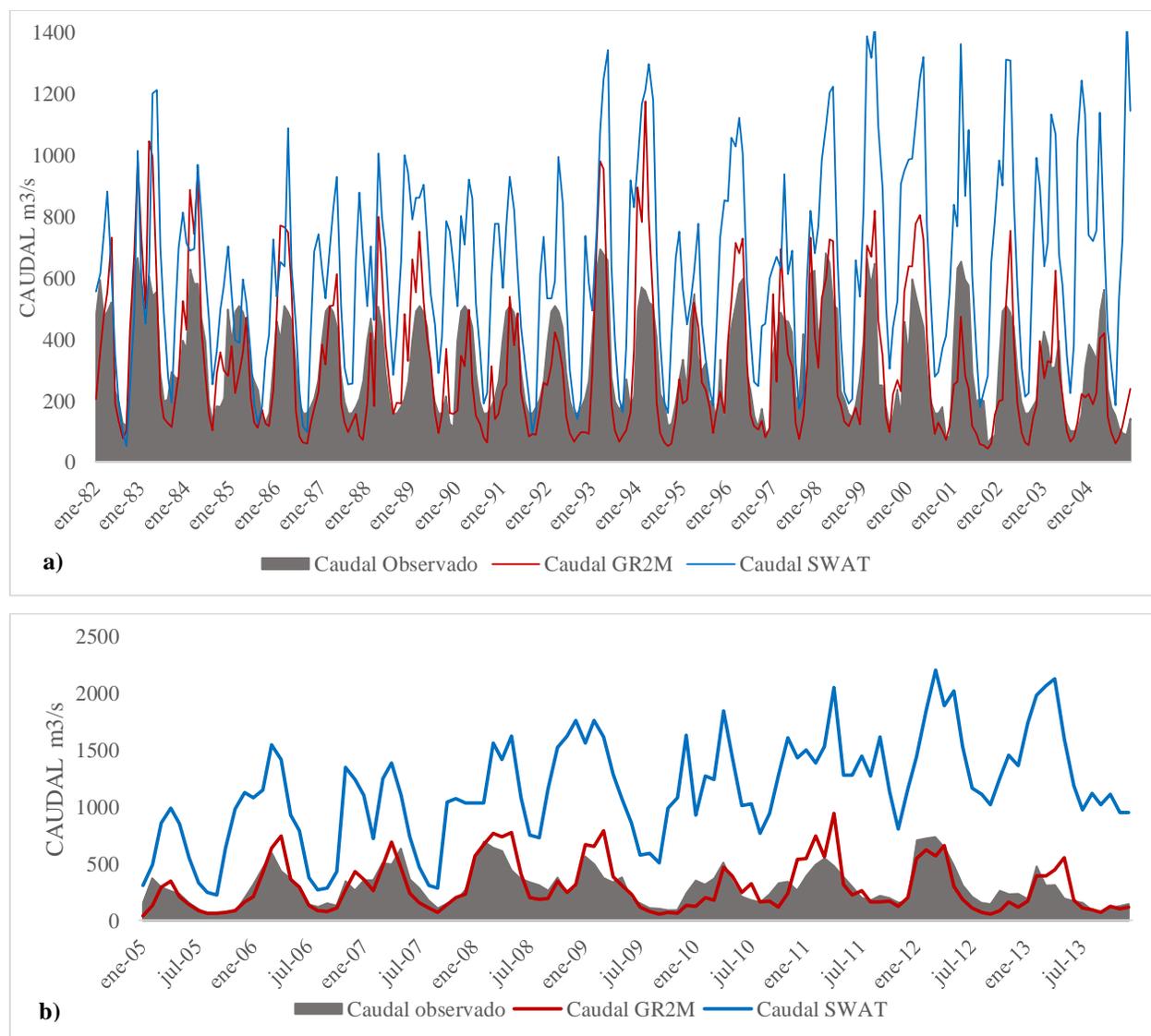
Elaborado por: Los autores (2018)

Tabla 15: Criterios de eficiencia para los modelos GR2M y SWAT

Período	Modelo	Caudal (m3/s)		Estadístico	
		Obs	Sim	R ²	Nash
CALIBRACIÓN	GR2M	330.12	316.11	0.63	0.62
	SWAT		638.83	0.36	0.19
VALIDACIÓN	GR2M	289.85	293.32	0.66	0.66
	SWAT		1147.56	0.34	0.07

Elaborado por: Los autores (2018)

Figura 20: Calibración y validación del modelo GR2M y SWAT para la Subcuenca del Río Guayllabamba con los caudales observados y simulados. a) Hidrograma de calibración para el período 1982-2004, b) hidrograma de validación para el período 2005-2013



Elaborado por: Los autores (2018)

11. IMPACTOS (TÉCNICOS, SOCIALES, AMBIENTALES O ECONÓMICOS)

Técnicos:

- Los modelos hidrológicos como GR2M y SWAT permiten la simulación y predicción de los fenómenos físicos a escala de tiempo mensual. Así como podemos obtener relaciones causa-efecto, sin haber realizado cambios en los sistemas reales.
- Los modelos hidrológicos representan la cuenca hidrográfica y los componentes del ciclo hidrológico. Conocer el comportamiento del ciclo hidrológico implica entender la 'respuesta' de la cuenca de manera continua en el tiempo y en el espacio, de esta manera tomar decisiones en el manejo de la cuenca hidrográfica.
- El modelo GR2M permite predecir los totales mensuales de escorrentía para la subcuenca del Río Guayllabamba.

Sociales:

- Conocer la simulación de caudales en una cuenca permite proponer proyecto de abastecimiento de agua potable e industrial, satisfacer la demanda de un proyecto de irrigación y proyectos de generación de energía eléctrica.

Ambientales:

- La simulación de caudales permite el análisis de la capacidad de los cuerpos receptores de efluentes del sistema de aguas industriales y urbanas y así conocer el impacto sobre el medio ambiente, incluyendo su relación con los seres vivos.

Económicos:

- La simulación hidrológica permite determinar los costos de la construcción de obras hidráulica, proyectos de presas, irrigación, regulación de cursos de agua y control de inundaciones.

12. PRESUPUESTO PARA LA PROPUESTA DEL PROYECTO

Recursos	PRESUPUESTO PARA LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO			
	Cantidad	Unidad	V. Unitario \$	Valor total \$
Equipos:				
Computadora	1	Dólares	700,00	700,00
Impresora	1	Dólares	170,00	170,00
Materiales y suministros:				
Libreta de campo	2	Dólares	2,00	4,00
Material de gabinete		Dólares	5,60	5,60
Material bibliográfico y fotocopias:				
Artículos científicos	10	Dólares	45	450,00
Copias del proyecto	400	Dólares	0,03	12,00
Gastos varios:		Dólares	78,00	78,00
Total				1419,60
10%				141,96
TOTAL				1561,56

13. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

13.1. Conclusiones

El modelo GR2M alcanzó una eficiencia satisfactoria en la simulación de caudales con un coeficiente de Nash de 0.62 y 0.66 y un coeficiente de determinación R^2 de 0.63 y 0.66, en la calibración y la validación respectivamente. Sin embargo, SWAT presenta un ajuste insuficiente con un coeficiente de Nash de 0.19 y 0.07, y un coeficiente de determinación R^2 de 0.36 y 0.34, en la calibración y validación.

Con el análisis de eficiencia se puede determinar que el mejor modelo para el pronóstico de caudales medios mensuales en la Subcuenca es el modelo agregado GR2M. Los valores arrojados en la calibración y validación son 316.11 m³/s y 293.32 m³/s en comparación a los observados 330.12 m³/s y 298.85 m³/s

El modelamiento con SWAT no se ajustó eficientemente al área de estudio debido al uso del motor climático mundial (CFSR), obteniendo una sobrestimación de caudales en la Subcuenca del Río Guayllabamba.

13.2. Recomendaciones

Para optimizar la simulación con el modelo semi-distribuido SWAT es necesario disponer con información meteorológica diaria de caudal, precipitación y temperatura.

La presente investigación puede servir como línea base para la generación de estudios hidrológicos basados en el pronóstico de caudales.

Se recomienda utilizar un modelo sencillo (lluvia – escorrentía) para modelaciones hidrológicas en cuencas andinas.

14. BIBLIOGRAFÍA

- Alcántara, A., Montalvo, N., Mejía, A., & Ingol, E. (2014). Validación de modelos hidrológicos lluvia-escorrentía para su aplicación a la cabecera de cuenca del río Jequetepeque. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica*, 17(33).
- Alcántara, D. A. (2014). *Topografía y sus aplicaciones*. Recuperado a partir de <http://site.ebrary.com/lib/interpuertoricosp/Doc?id=11017471>
- Apaclla, R. (2010). *ESTUDIO DE MÁXIMAS AVENIDAS EN LAS CUENCAS DE LA ZONA CENTRO DE LA VERTIENTE DEL PACÍFICO* (Informe técnico) (p. 185). Lima: DIRECCIÓN DE CONSERVACIÓN Y PLANEAMIENTO DE RECURSOS HÍDRICOS. Recuperado a partir de <http://www.ana.gob.pe/media/390377/informe%20final%20zona%20centro.pdf>
- Arévalo, H. V., & Obando, O. F. (2011). Modelización de los caudales medios mensuales en la cuenca del río Ramis Monthly means flow modeling into Ramis basin. *REVISTA PERUANA GEO-ATMOSFÉRICA RPGA*, 3, 9.
- Aristizabal, V. M., & Jaramillo, J. C. (2013). *Modelos hidrológicos e hidráulicos de zonificación de la amenaza por inundación en el municipio de La Dorada Caldas* (Informe técnico) (p. 134). Colombia: CORPOCALDAS. Recuperado a partir de http://pdpmagdalenacentro.org/Informe_t%C3%A9cnico_CONTR-163-12_Zonas_de_inundaci%C3%B3n_CorpoCaldas.pdf
- Cabrera, J. (2012a). Calibración de modelos hidrológicos. *Instituto para la Mitigación de los Efectos del Fenómeno El Ni-o, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, Perú*.
- Cabrera, J. (2012b). Modelos hidrológicos. *Instituto para la Mitigación de los Efectos del Fenómeno El Ni-o, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, Perú*, 8.
- Cabrera, J. (2012c). Unidad de Respuesta Hidrológica (H.R.U.). *Instituto para la Mitigación de los Efectos del Fenómeno El Ni-o, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, Perú*, 2.

- Cabrera, J. (2012d). Validación de Modelos Hidrológicos. *Instituto para la Mitigación de los Efectos del Fenómeno El Ni-o, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, Perú*, 4.
- Calero, F. B. R. (2015). CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS Y EFECTOS EN LA SALUD EN UNA REGIÓN LLAMADA SANTO DOMINGO DE LOS TSÁCHILAS, ECUADOR. *Mikarimin. Revista Científica Multidisciplinaria. e-ISSN 2528-7842, 1(2)*, 33–44.
- Cardona, B. L. (2013). Conceptos básicos de Morfometría de Cuencas Hidrográficas. *Recuperado de: [http://www.repositorio.usac.edu.gt/4482/1/Conceptos% 20b% C3% AIsicos% 20de% 20Mo rfometr% C3% ADa% 20de% 20Cuencas% 20Hidrogr% C3% Alficas. pdf](http://www.repositorio.usac.edu.gt/4482/1/Conceptos%20b%C3%A1sicos%20de%20Morfometr%C3%ADa%20de%20Cuencas%20Hidrogr%C3%A1ficas.pdf)*.
- Castillo, C. R. M., Ortega, N. F. G., & Cisneros, F. E. (2009). *Modelación hidrológica de microcuencas de montaña usando el modelo hidrológico Swat*. Universidad de Cuenca, Cuenca. Recuperado a partir de <http://cdjbv.ucuenca.edu.ec/ebooks/ti818.pdf>
- Centro Aragonés de Tecnologías para la Educación. (2016). 5. Uso del suelo. Recuperado 29 de diciembre de 2017, a partir de http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/2500/2631/html/5_uso_del_suelo.html
- Córdova, D. B. (2015). *Análisis de la precipitación futura en la cuenca Chancay-Huaral mediante el modelo GCM-MRI*. Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima. Recuperado a partir de <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/2174/P40-C67-T.pdf?sequence=1>
- Fattorelle, S., & Fernandez, P. (2011). *Diseño hidrológico* (Segunda). Zaragoza: WASA-GN. Recuperado a partir de http://www.ina.gov.ar/pdf/Libro_diseno_hidrologico_edicion_digital.pdf
- Gaspari, F., Rodríguez Vagaría, A., Senisterra, G., Denegri, G. A., Delgado, M. I., & Besteiro, S. I. (2012). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. *AUGM DOMUS, 4*, 16.
- Juncosa, R., & Padilla, F. (2009a). Capítulo 4: Evaporación y transpiración. Evapotranspiración. *En Hidrología superficial y subterránea* (Primera, p. 24). España: Universidade da Coruña. Recuperado a partir de http://caminos.udc.es/info/asignaturas/grado_itop/415/pdfs/Capitulo%204.pdf

- Juncosa, R., & Padilla, F. (2009b). Capítulo 5: Escorrentía. En *Hidrología superficial y subterránea* (Primera, p. 20). España: Universidade da Coruña. Recuperado a partir de http://caminos.udc.es/info/asignaturas/grado_itop/415/pdfs/Capitulo%205.pdf
- Juncosa, R., & Padilla, F. (2009c). Capítulo 7: Balances hídricos. En *Hidrología superficial y subterránea* (Primera, p. 14). España: Universidade da Coruña. Recuperado a partir de http://caminos.udc.es/info/asignaturas/grado_itop/415/pdfs/Capitulo%207.pdf
- Krause, P., Boyle, D. P., & Bäse, F. (2005). Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in geosciences*, 5, 89–97.
- Mendieta, J. A. O., & Valencia, R. E. C. (2005). *Cartografía básica aplicada*. Universidad de Caldas.
- Ocampo, O. L., & Vélez, J. J. (2014). Comparative analysis of continuous simulation hydrological models in high-mountain watersheds: Chinchiná River case. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 13(24), 43–58.
- Ordóñez, J. J. G. (2011). *Cartilla técnica: ¿qué es cuenca hidrológica?* Lima: Sociedad Geográfica de Lima : Foro Peruano para el Agua.
- Orduña, L. M. (2007). *Pronóstico probabilístico de caudales de avenida mediante redes bayesianas aplicadas sobre un modelo hidrológico distribuido*. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid. Recuperado a partir de http://oa.upm.es/669/1/LUIS_MEDIERO_ORDU%C3%91A.pdf
- Organización de las Naciones Unidas de Alimentación y Agricultura. (2017). EL SUELO, DIFERENCIAS SEGÚN SU ASPECTO FÍSICO Y QUÍMICO. Recuperado 29 de diciembre de 2017, a partir de <http://www.fao.org/docrep/009/ah645s/AH645S04.htm>
- Ospina, M. J. G., & Mancipe, J. S. G. (2016). *Estudio Morfométrico y Estimación de caudal de creciente de la quebrada Canauchita del municipio de Otanche-Boyacá utilizando el método racional*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá. Recuperado a partir de <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/2562/3/MancipeGironzaJuanSebastian2016.pdf>
- Proaño, M., Gavilanes, C., Valenzuela, P., & Cisneros, C. (2006). Aplicación del modelo SWAT en la subcuenca del Río Ambato. *Investigaciones geográficas*, (32).

- Pulido, N. (2011). El crecimiento urbano en las cuencas de la región Andes de Venezuela y su articulación con el recurso agua. *Revista Geográfica Venezolana*, 52(2).
- Salazar, B. (2016). Regresión Lineal. Recuperado 21 de enero de 2018, a partir de <http://www.ingenieriaindustrialonline.com/herramientas-para-el-ingeniero-industrial/pronóstico-de-ventas/regresión-lineal/>
- Sánchez, A., García, R. M. G., & Palma, A. (2003). *La cuenca hidrográfica: unidad básica de planeación y manejo de recursos naturales* (Primera). México: SEMARNAT, Centro de Educación y Capacitación para el Desarrollo Sustentable : Cruzada por los Bosques y el Agua. Recuperado a partir de http://centro.paot.org.mx/documentos/semarnat/cuenca_hidrografica.pdf
- Sangaku, M. (2018). Media aritmética. Recuperado 21 de enero de 2018, a partir de <https://www.sangakoo.comes/temas/media-aritmetica>
- Segerer, C., & Villodas, R. (2006). Unidad 5: Las precipitaciones. En *Hidrología I* (Universidad Nacional de Cuyo, p. 26). Argentina. Recuperado a partir de <http://www.conosur-rih.net/ADVF/documentos/hidro1.pdf>
- Uribe, N. (2010). Conceptos básicos y guía rápida para el usuario. Recuperado 30 de diciembre de 2017, a partir de <http://swat.tamu.edu/media/46967/swat2005-tutorial-spanish.pdf>

15. ANEXOS

Anexo 1: Hoja de vida

DATOS PERSONALES

APELLIDOS: Gallo Llumigusin

NOMBRES: Karen Estefania

ESTADO CIVIL: Soltera

CEDULA DE CIUDADANIA: 1725920845

LUGAR Y FECHA DE NACIMIENTO: Machachi, 03-septiembre-1993

DIRECCION DOMICILIARIA: Machachi, Barrio La Avanzada

TELÉFONO CONVENCIONAL: 022-316-275 TELÉFONO CELULAR: 0989-154-744

CORREO ELECTRÓNICO: karen.gallo5@utc.edu.ec

EN CASO DE EMERGENCIA CONTACTARSE CON: Blanca Gallo 0967-747-625



ESTUDIOS REALIZADOS Y TÍTULOS OBTENIDOS

NIVEL	INSTITUCIÓN	FECHA
PRIMER	Escuela Isabel Yánez	2000-2006
SEGUNDO	Colegio Nacional Experimental Femenino Espejo	2006-2011
TERCERO	Universidad Técnica de Cotopaxi	Actualmente

FORMACIONES ADICIONALES E INTERESES

2016: II Conferencia magistral: sobre prevención de riesgos laborales

GAD Provincial de Cotopaxi

2 Horas

2016: Ayudante del técnico de laboratorio

AqLab: Laboratorios de Análisis y Evaluación Ambiental

(Francisco Puerto de Orellana – Orellana)

2017: III Congreso internacional de Ingeniería Ambiental, Forestal y Ecoturismo

Universidad Técnica Estatal de Quevedo

40 Horas académicas

FIRMA

DATOS PERSONALES

APELLIDOS: Iza Jiménez

NOMBRES: Bryan Antonio

ESTADO CIVIL: Soltero

CEDULA DE CIUDADANIA: 2200134696

LUGAR Y FECHA DE NACIMIENTO: Pto. Francisco de Orellana,
5 de Junio de 1995DIRECCION DOMICILIARIA: Latacunga, Hermanas Páez –
Quijano y OrdoñezTELÉFONO CONVENCIONAL: 062899741
0979145295

TELÉFONO CELULAR:

CORREO ELECTRÓNICO: antonymsb@gmail.com

EN CASO DE EMERGENCIA CONTACTARSE CON: Deici Jiménez 0986448721

**ESTUDIOS REALIZADOS Y TÍTULOS OBTENIDOS**

NIVEL	INSTITUCIÓN	FECHA
PRIMER	Escuela Agoyán	2001-2007
SEGUNDO	Colegio Guillermo Bustamante Cevallos	2007-2012
TERCERO	Universidad Técnica de Cotopaxi	Actualmente

FORMACIONES ADICIONALES E INTERESES2017: CERTIFICADO DE SEMINARIO: SOBRE CAMBIO CLIMÁTICO Y
Y ENERGÍAS RENOVABLES (40 horas académicas).2017: CERTIFICADO DE SEMINARIO: III Congreso internacional de Ingeniería Ambiental,
Forestal y Ecoturismo (40 horas académicas).

FIRMA

DATOS PERSONALES

APELLIDOS: Lara Landázuri

NOMBRES: Renán Arturo

ESTADO CIVIL: Casado

CEDULA DE CIUDADANIA: 0400488011

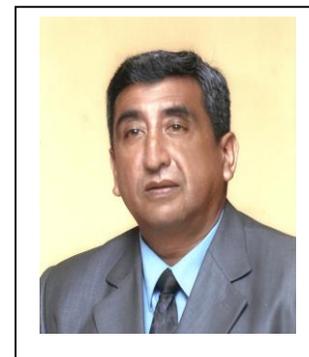
LUGAR Y FECHA DE NACIMIENTO: San Gabriel, 17-Abril-1956

DIRECCION DOMICILIARIA: Latacunga, Locoá

TELÉFONO CONVENCIONAL: 032-811-026 TELÉFONO CELULAR: 0984-795-339

CORREO ELECTRÓNICO: renan.lara@utc.edu.ec

EN CASO DE EMERGENCIA CONTACTARSE CON: Martha Viera 032-233-258

**ESTUDIOS REALIZADOS Y TÍTULOS OBTENIDOS**

NIVEL	TITULO OBTENIDO	FECHA DE REGISTRO EN EL CONESUP	CODIGO DEL REGISTRO CONESUP
TERCER	Ingeniero Hidrólogo	2008-10-17	1005R-08-4237
CUARTO	Diplomado en Educación Superior	28-07-2010	1020-10-713968
CUARTO	Maestría en Gestión de la Producción	2015-04-30	1020-15-86059461
CUARTO	Maestría en Ciencias Geográficas	En Trámite	En Trámite

HISTORIAL PROFESIONAL

FACULTAD EN LA QUE LABORA:

CAREN

CARRERA A LA QUE PERTENECE:

Medio Ambiente

SITUACIÓN LABORAL:

Docente, Vicedecano CAREN

AREA DEL CONOCIMIENTO EN LA CUAL SE DESEMPEÑA:

Manejo de los Recursos

Hídricos

PERIODO ACADEMICO DE INGRESO A LA UTC:

3 de septiembre del 2.001

FIRMA

Anexos 2: Aval de traducción

Universidad
Técnica de
Cotopaxi

CENTRO DE IDIOMAS

AVAL DE TRADUCCIÓN

En calidad de Docente del Idioma Inglés del Centro de Idiomas de la Universidad Técnica de Cotopaxi; en forma legal **CERTIFICO** que: La traducción del resumen del Proyecto de Titulación al Idioma Inglés presentado por los señores estudiantes: IZA JIMÉNEZ BRYAN ANTONIO y GALLO LLUMIGUSIN KAREN ESTEFANIA, cuyo título versa “**MODELAMIENTO CON SWAT Y GR2M PARA LA SUBCUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA**”, lo realizaron bajo mi supervisión y cumple con una correcta estructura gramatical del Idioma.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad y autorizo a los peticionarios hacer uso del presente certificado de la manera ética que estimaren conveniente.

Latacunga, Febrero del 2018

Atentamente,

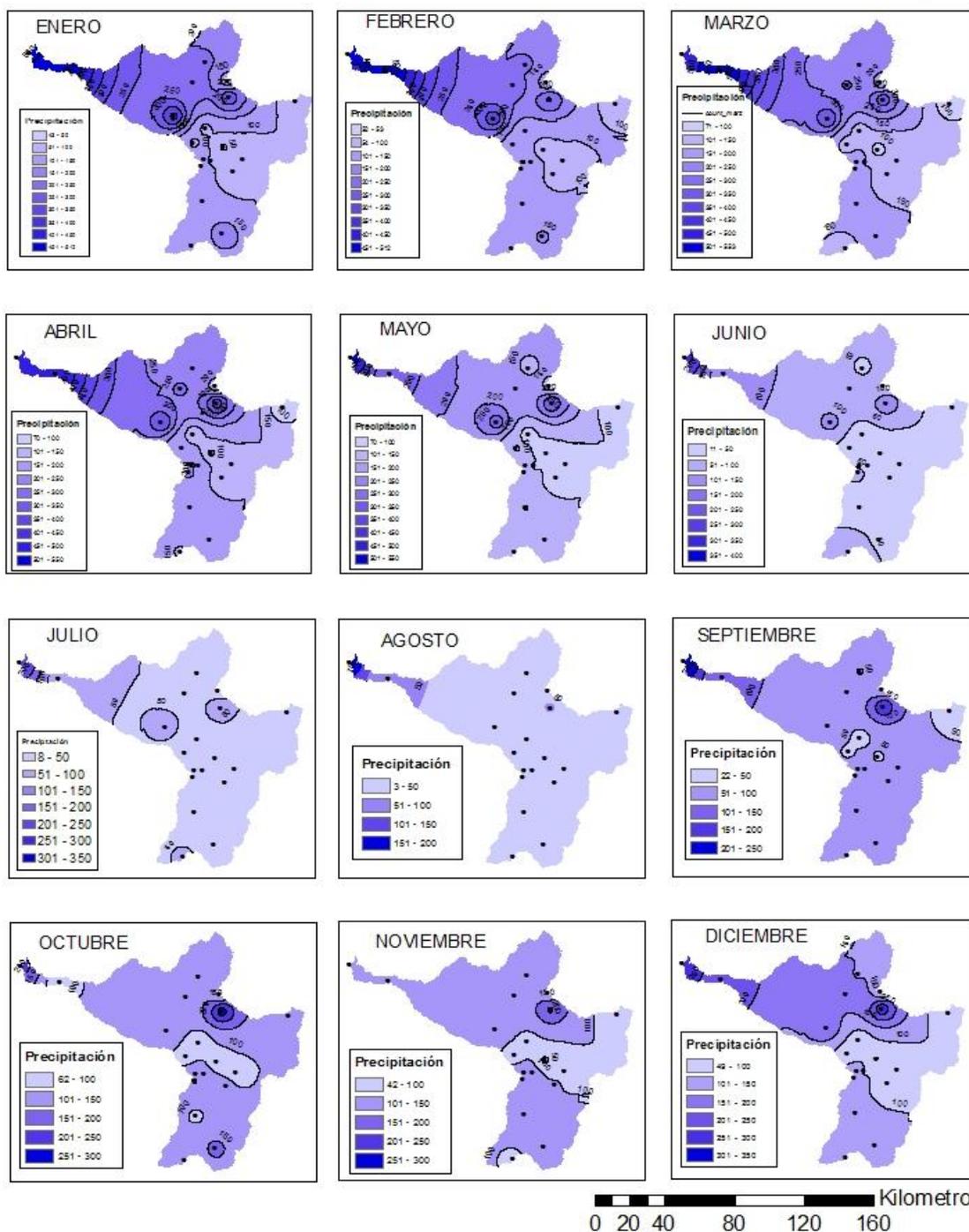
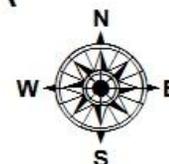
Lic. Wilmer Patricio Collaguazo Vega. Mg.
DOCENTE CENTRO DE IDIOMAS
C.C. 1722417571



CENTRO
DE IDIOMAS

Anexos 3: Mapa de Isoyetas de la Subcuenca del Río Guayllabamba

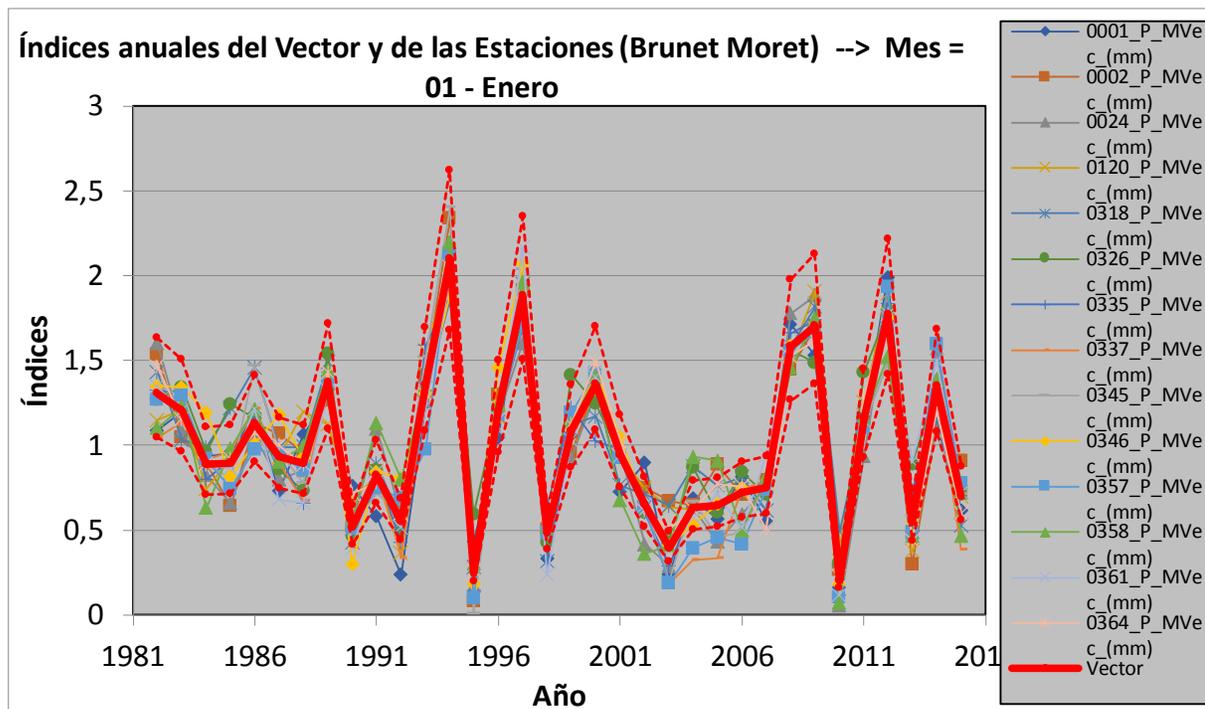
MAPA DE PRECIPITACIONES MEDIA DEL PERÍODO 1982-2013



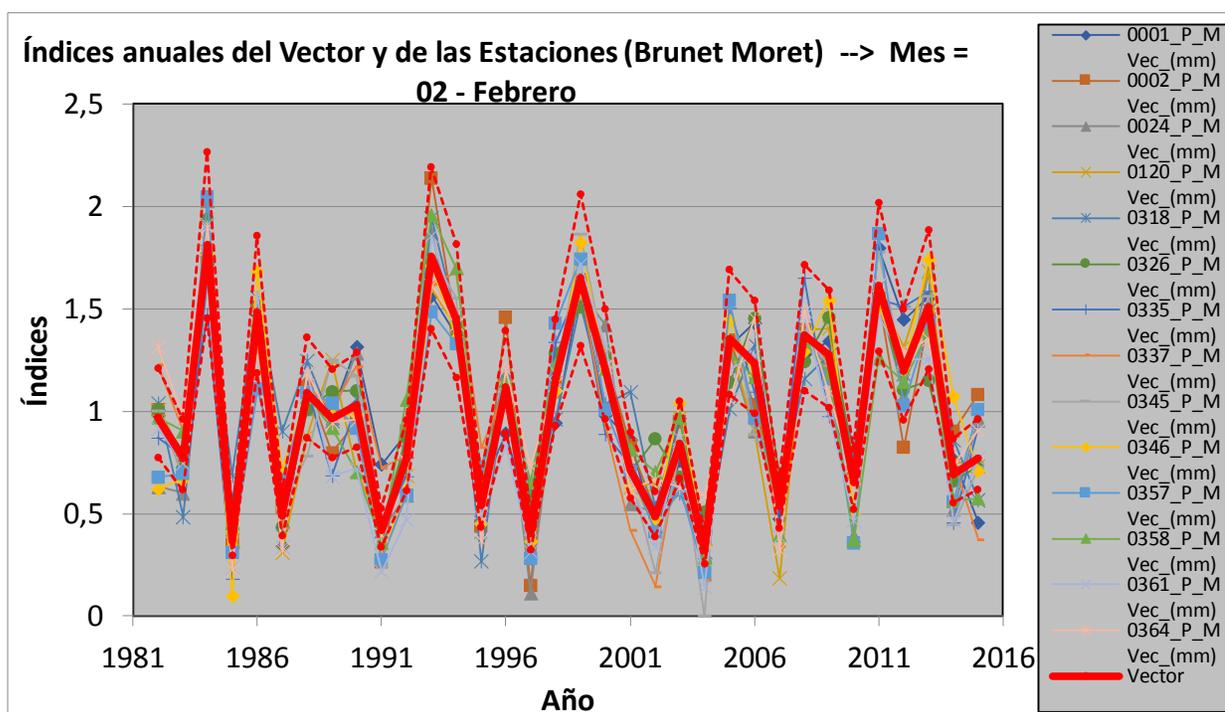
Elaborado por: Los autores (2018)

Anexo 4: Representación gráfica del vector regional de la Subcuenca alta del Río Guayllabamba precipitación de las estaciones

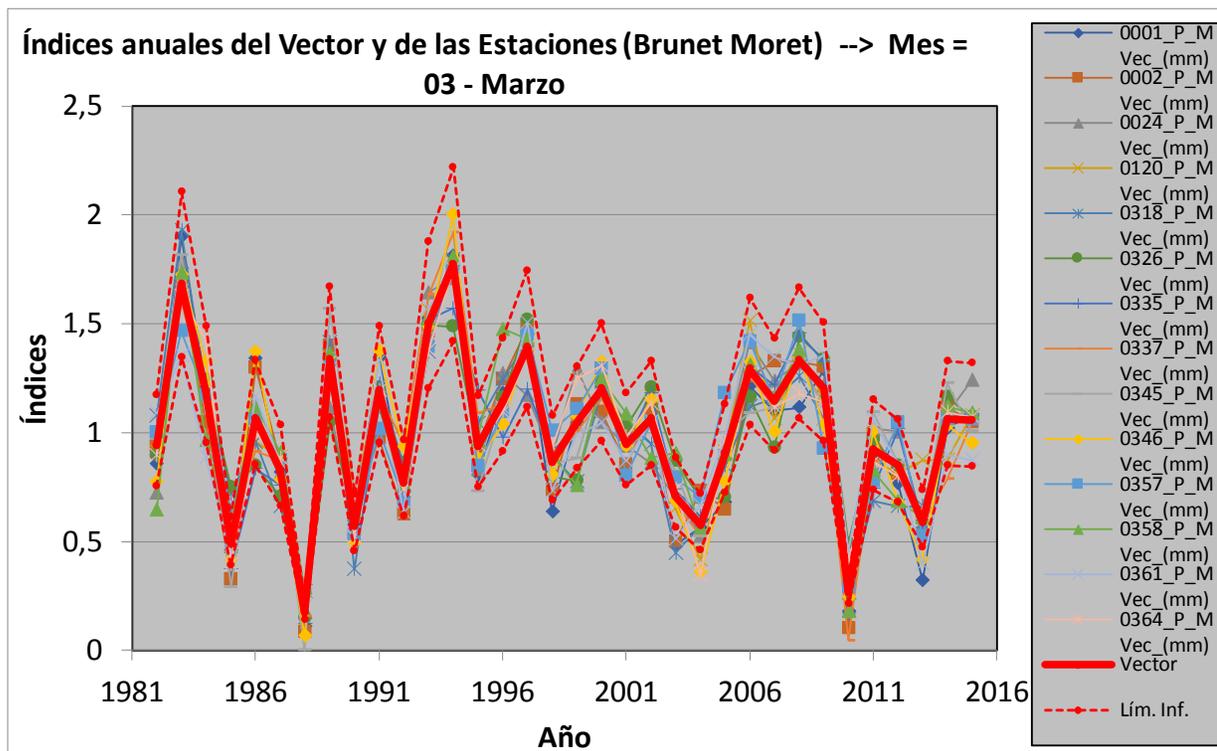
a) Enero



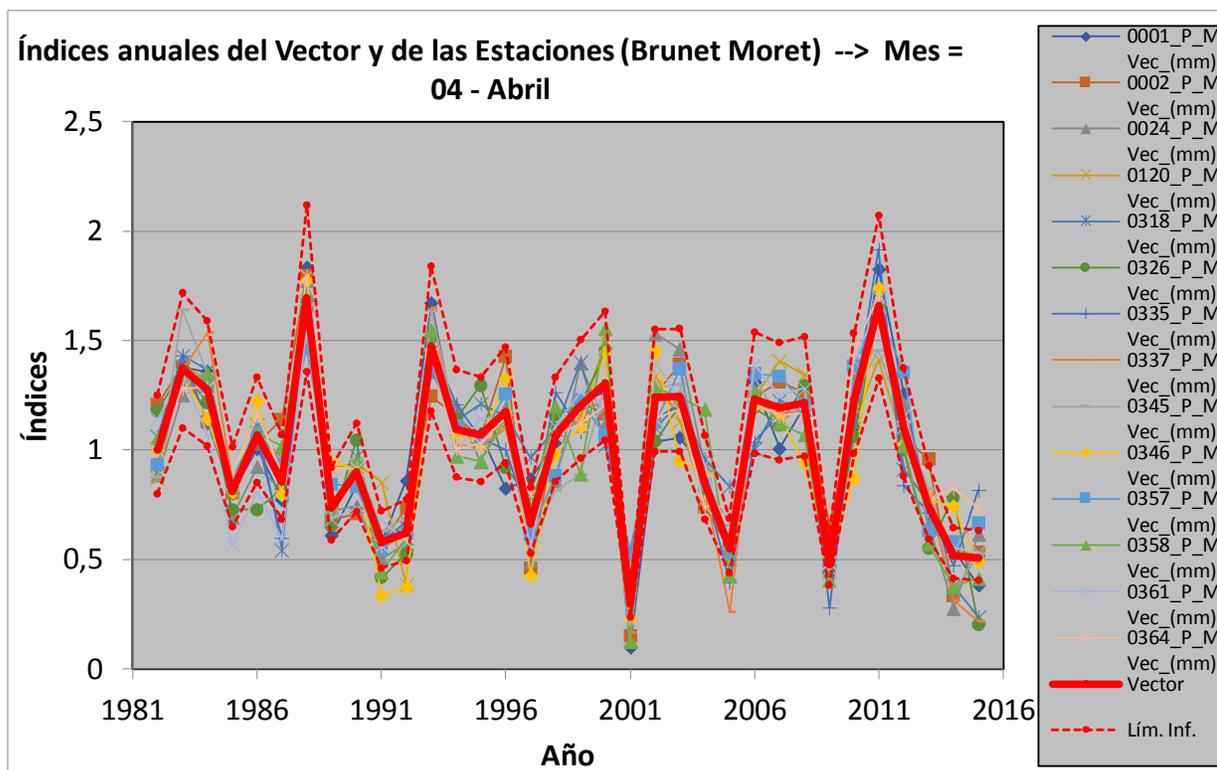
b) Febrero



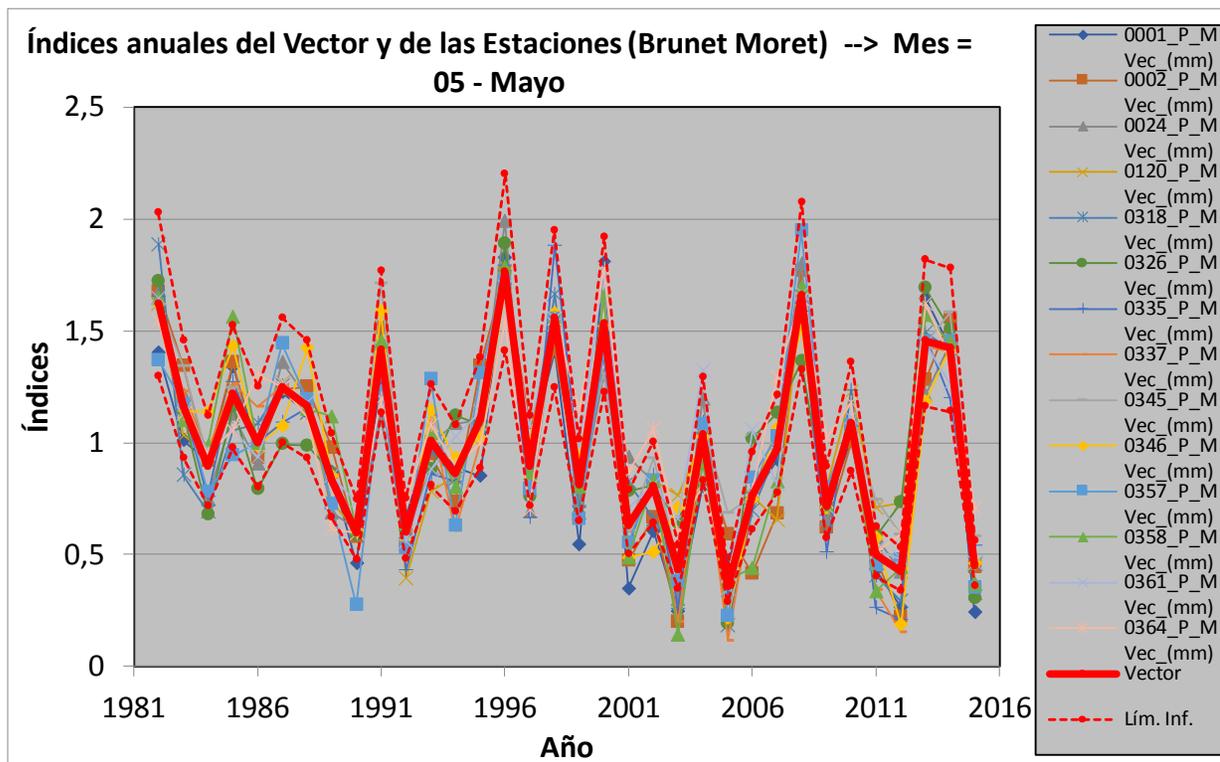
c) Marzo



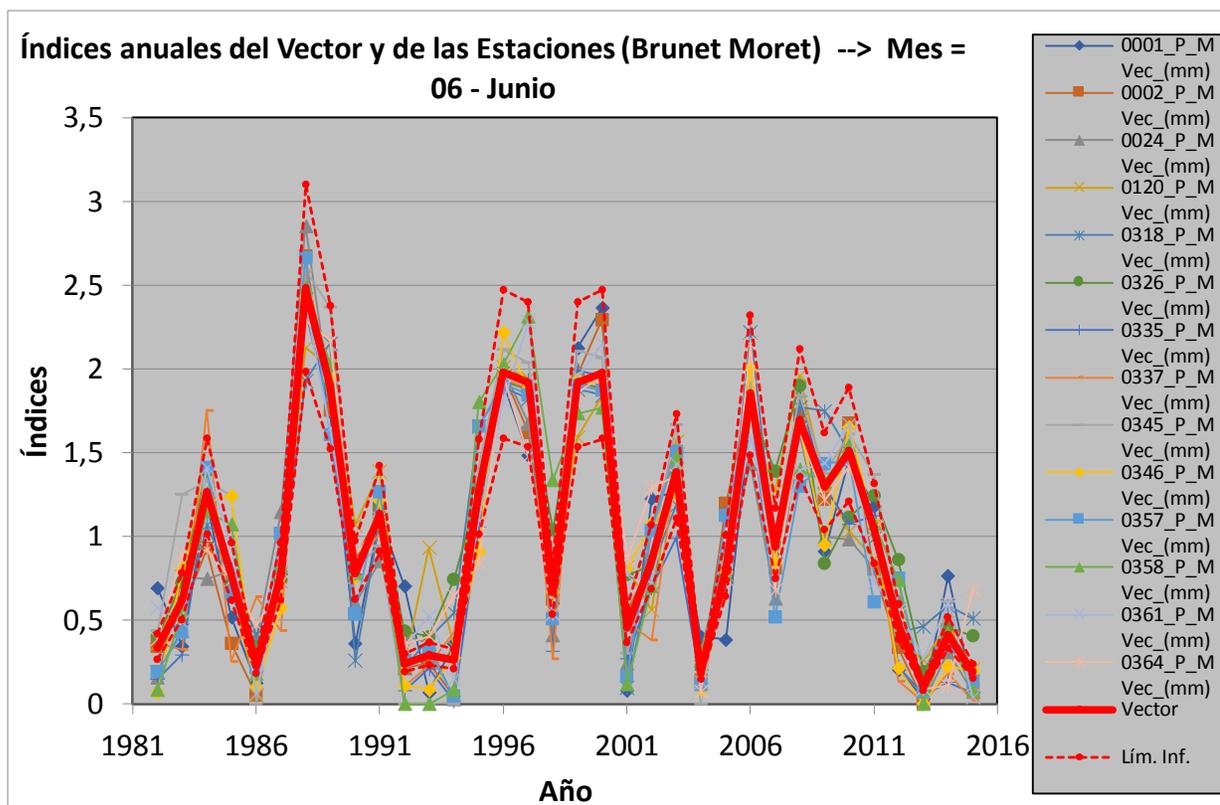
d) Abril



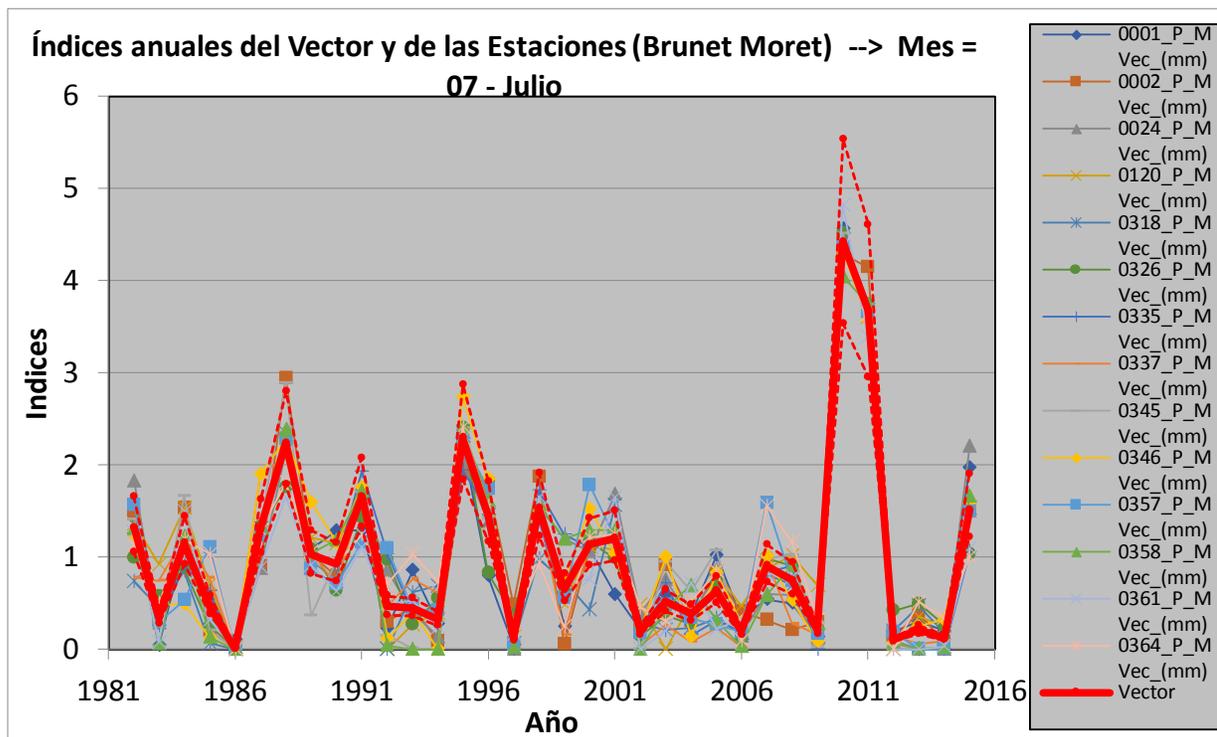
e) Mayo



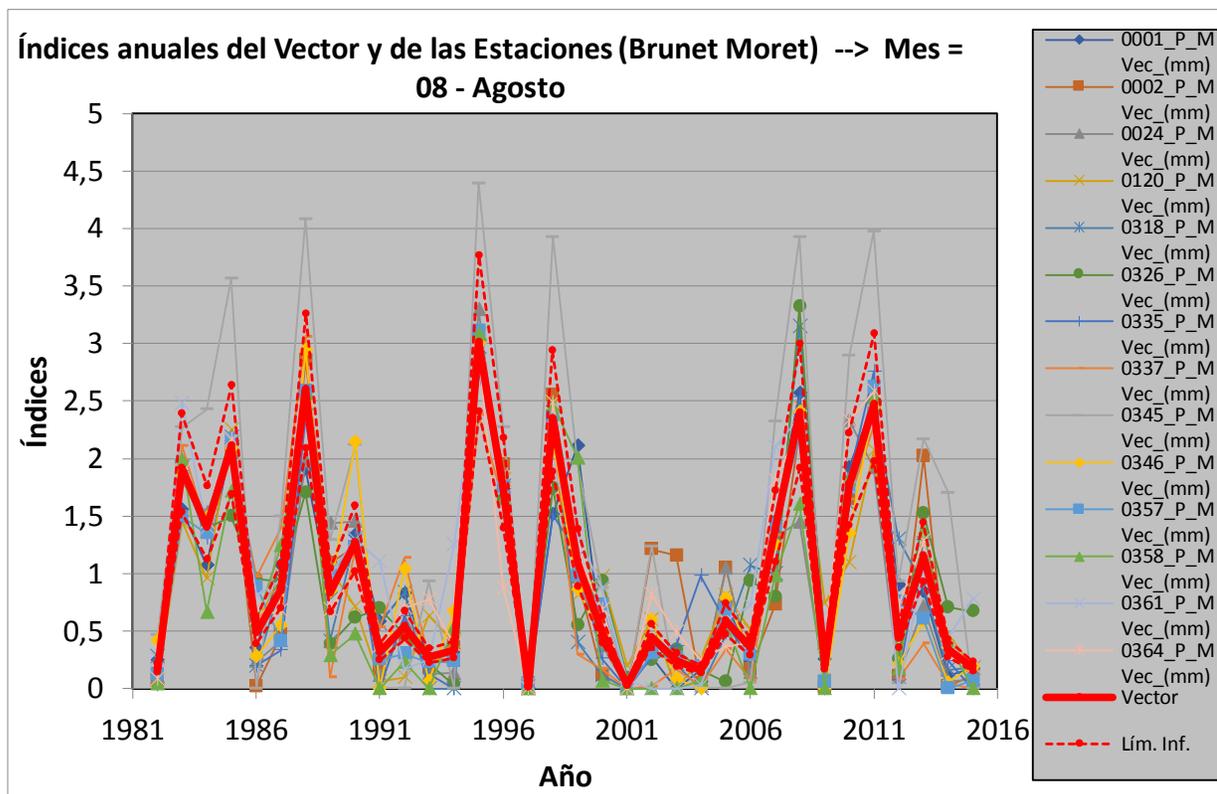
f) Junio



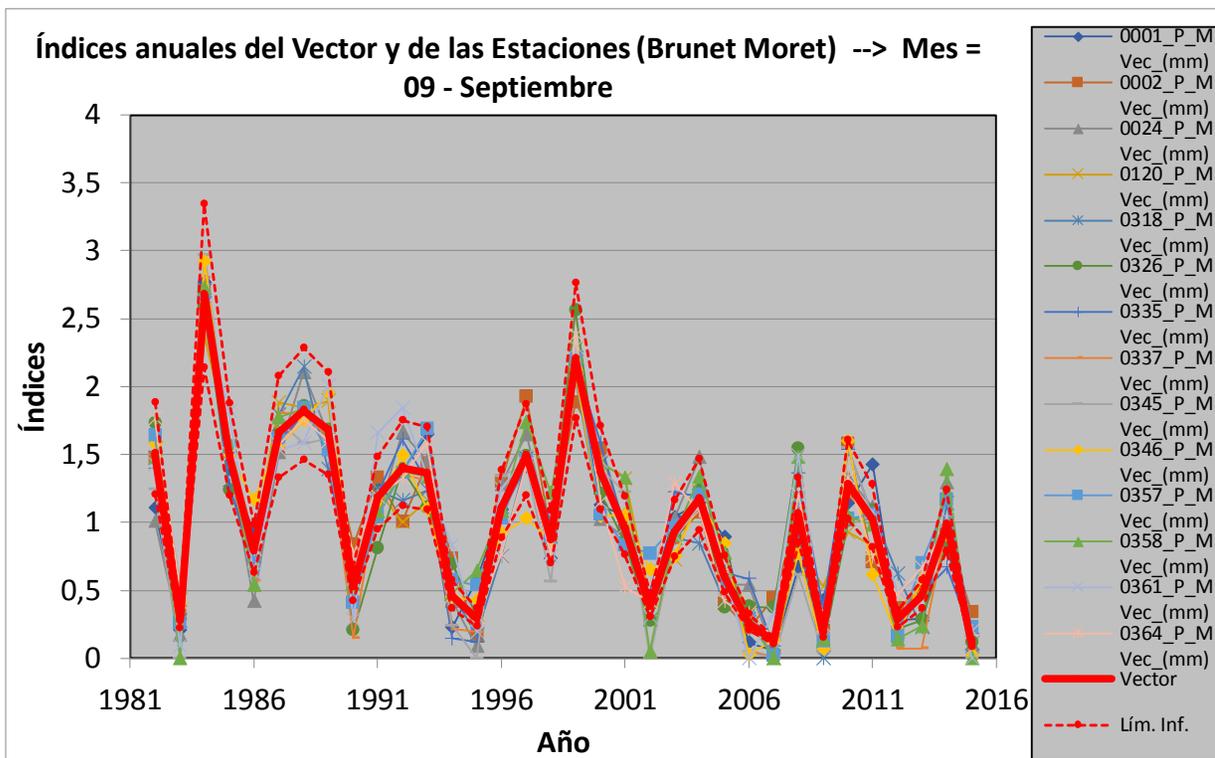
g) Julio



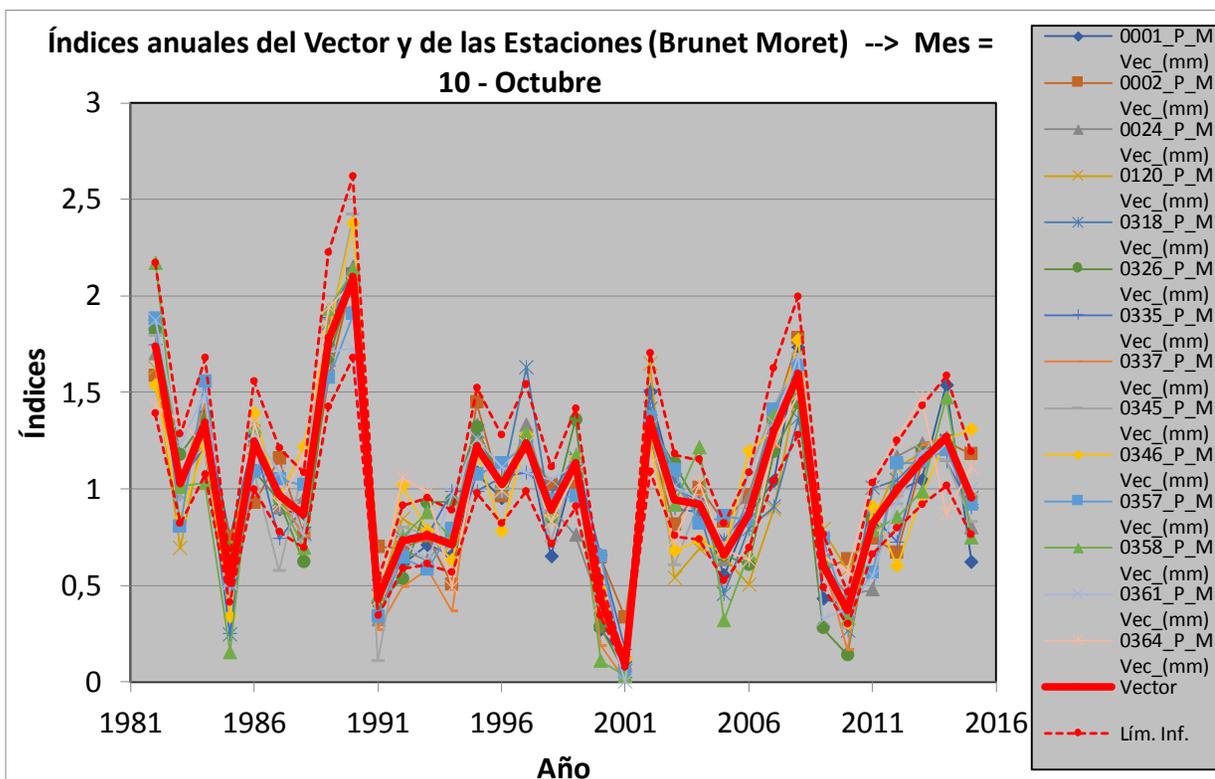
h) Agosto



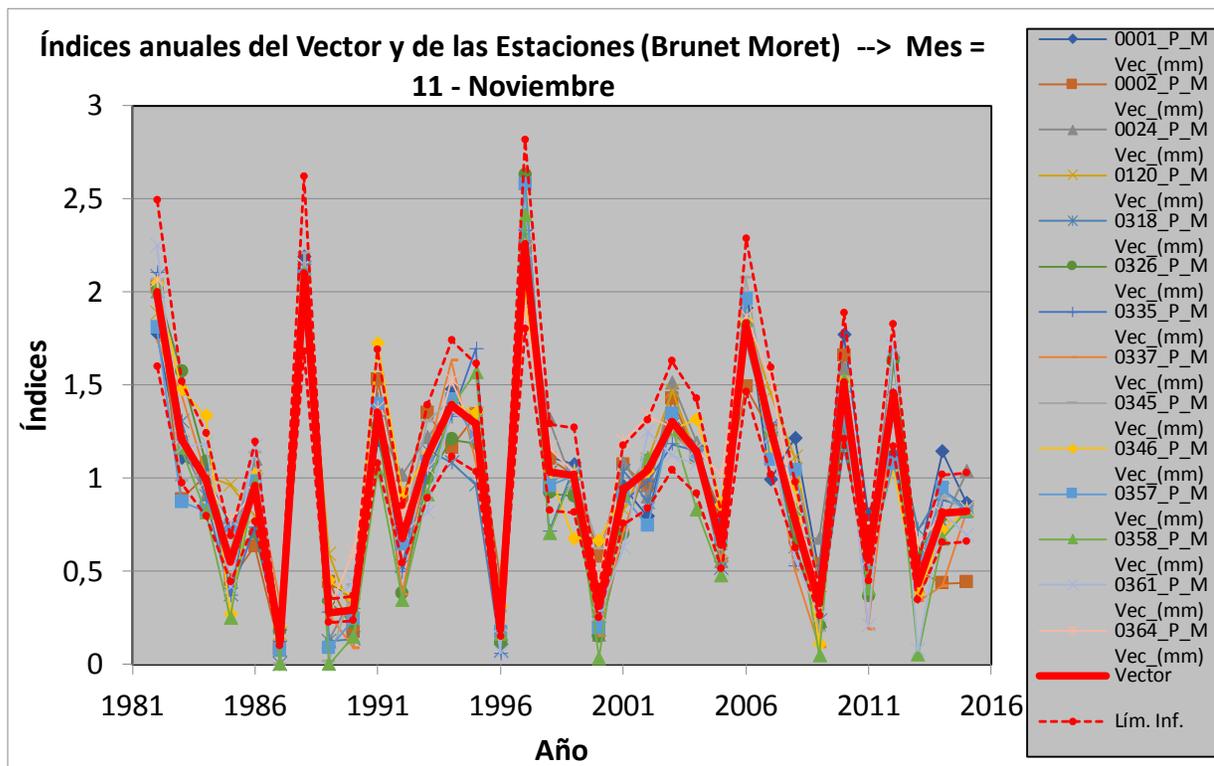
i) Septiembre



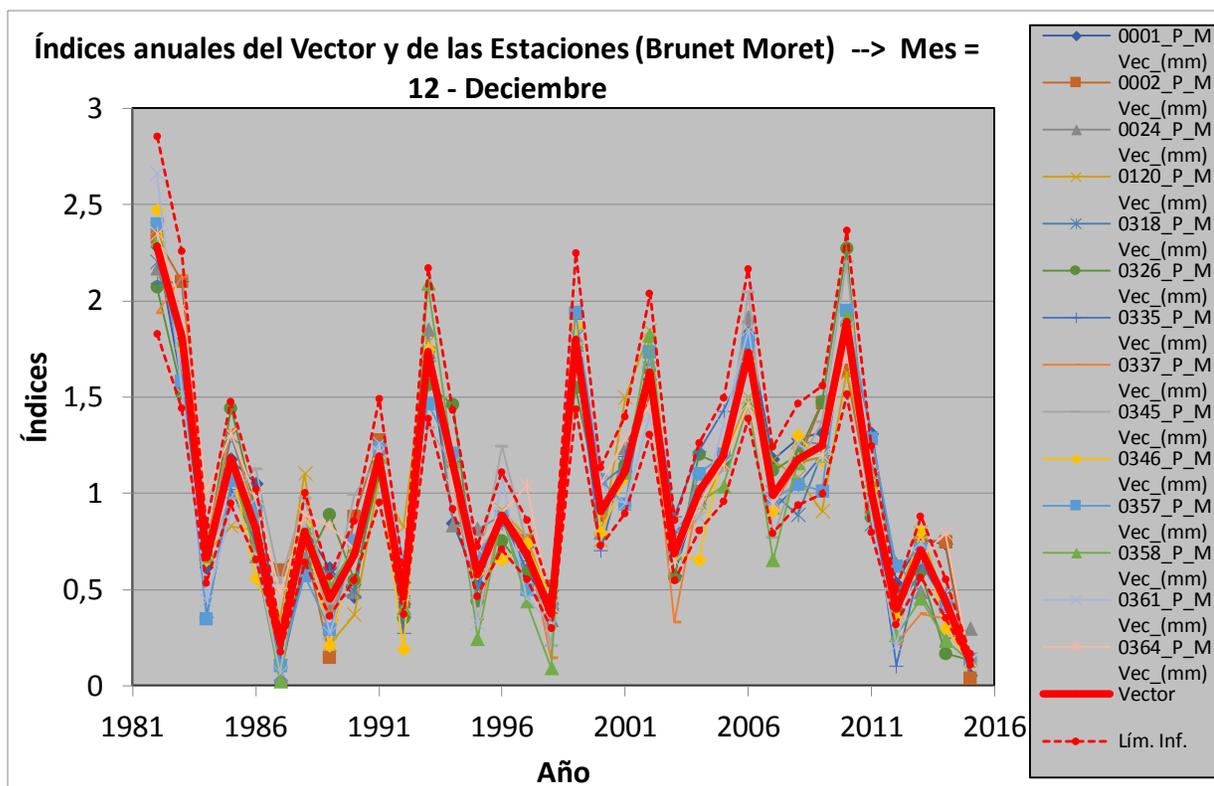
j) Octubre



k) Noviembre

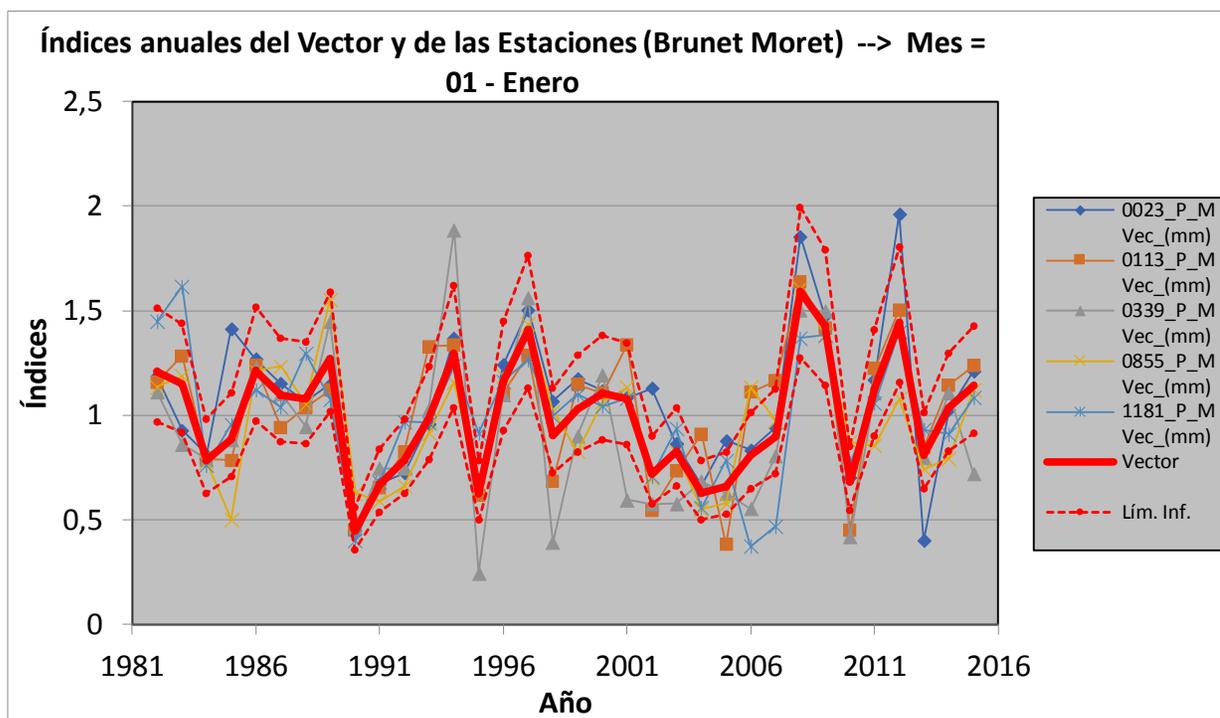


l) Diciembre

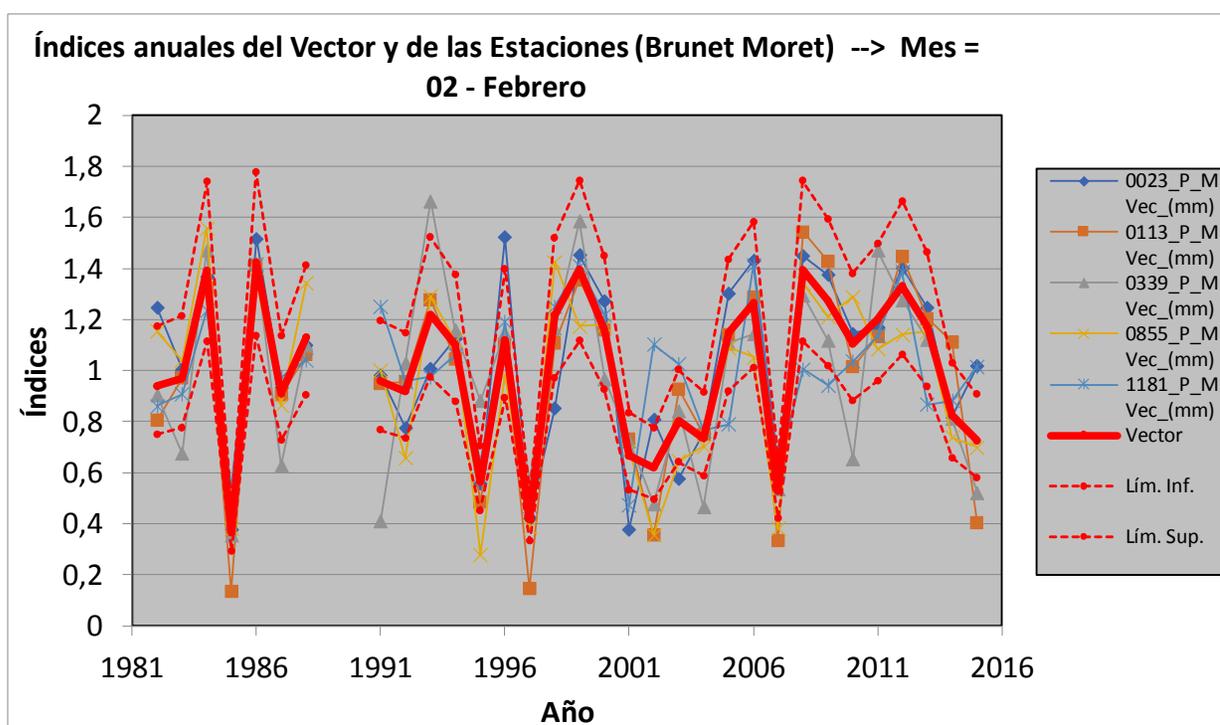


Anexo 5: Representación gráfica del vector regional de la Subcuenca alta del Río Guayllabamba precipitación de las estaciones restantes

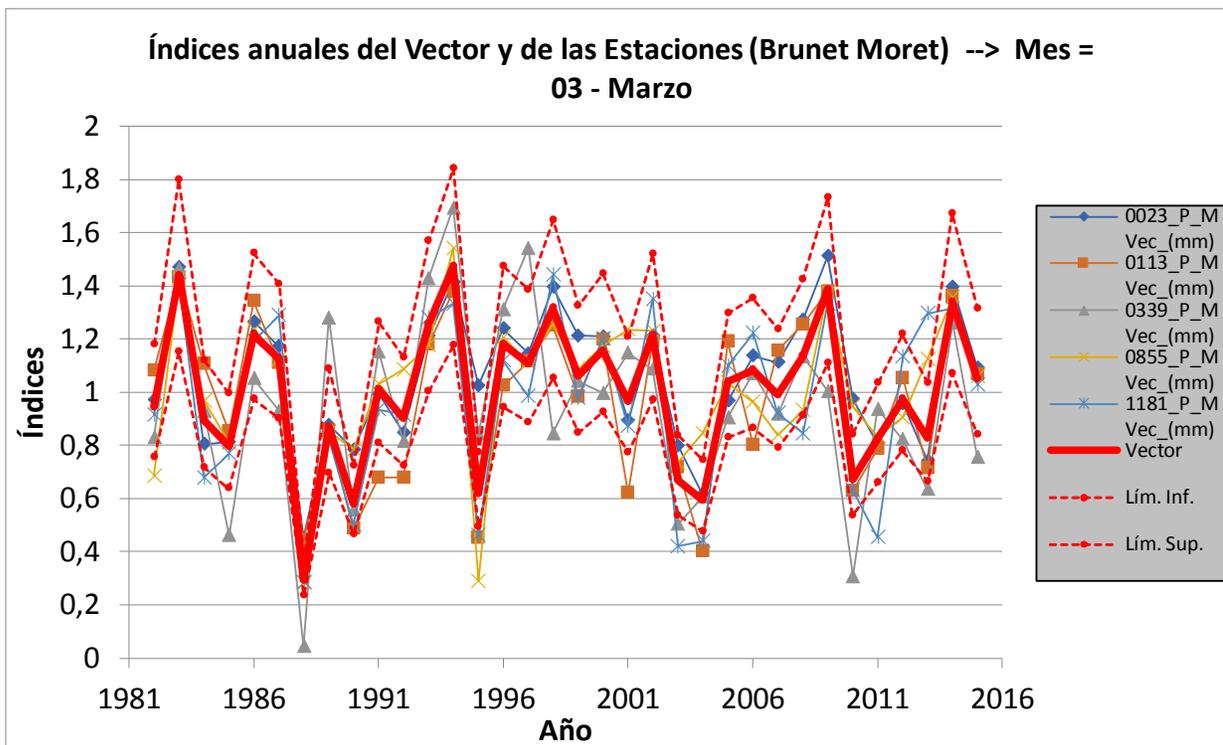
a) Enero



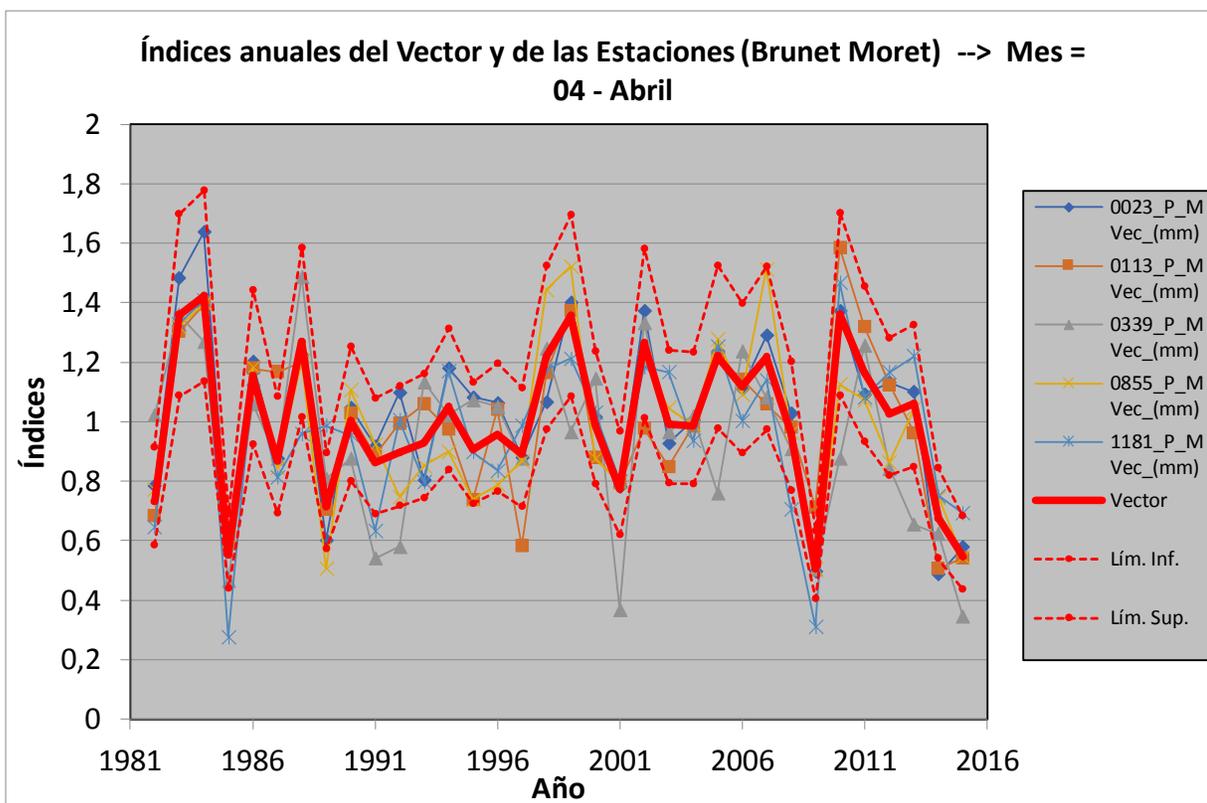
b) Febrero



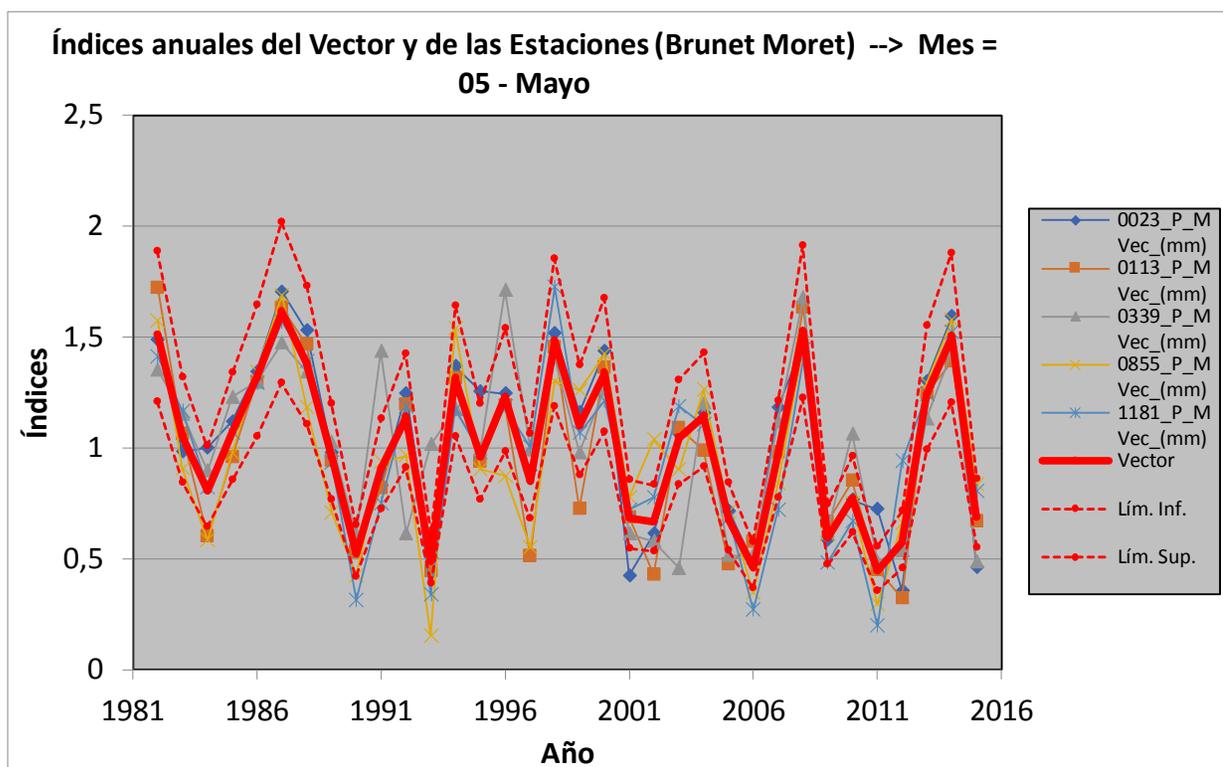
c) Marzo



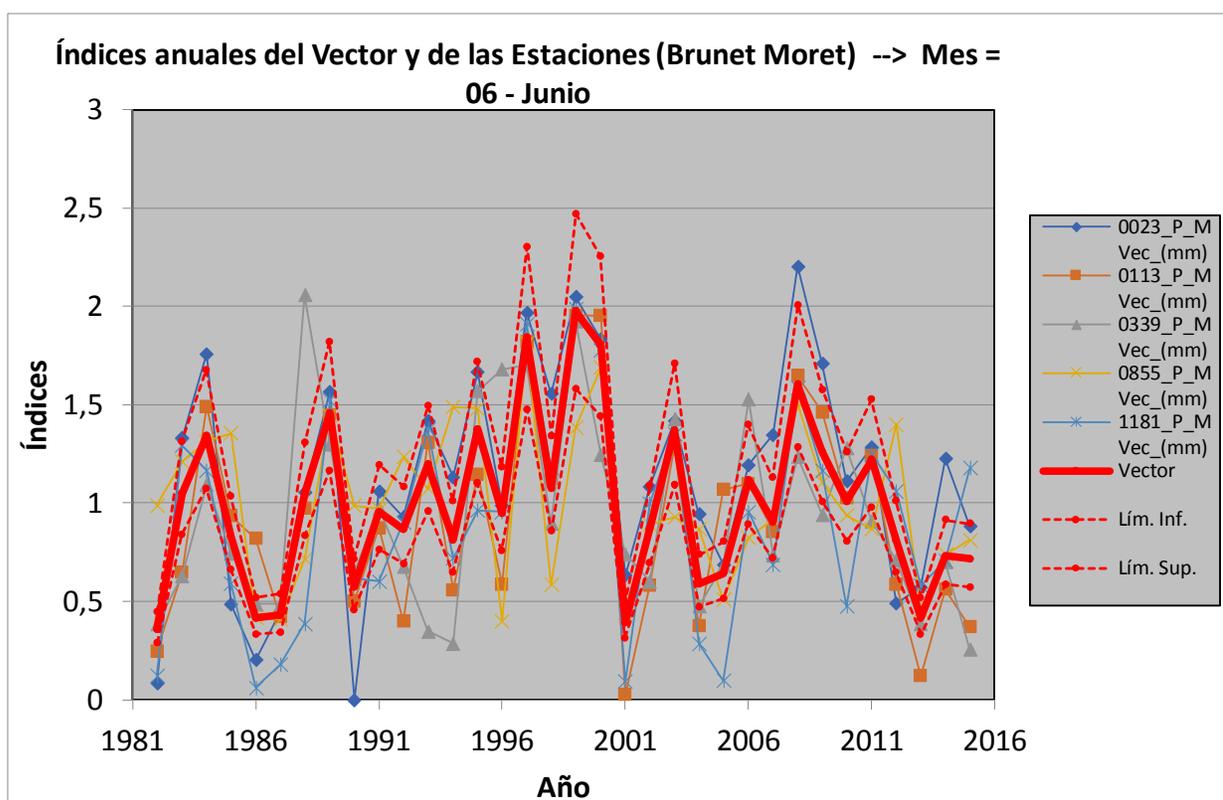
d) Abril



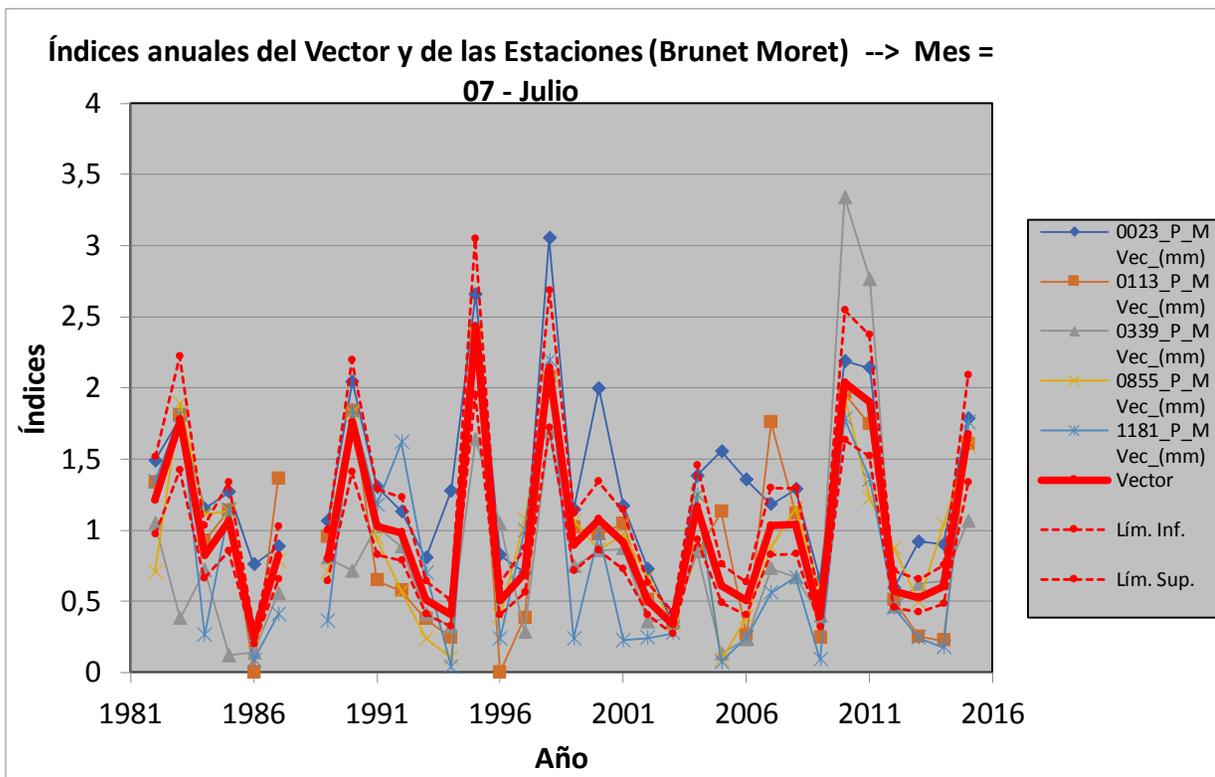
e) Mayo



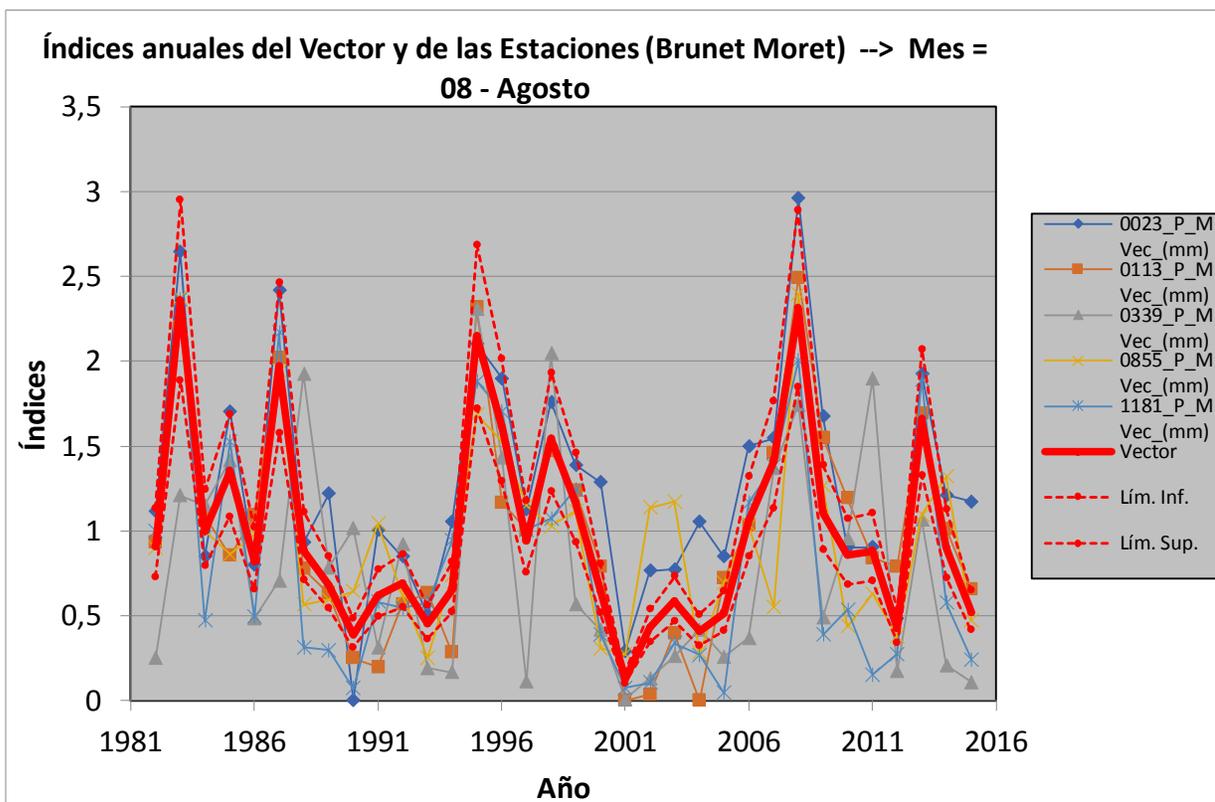
f) Junio



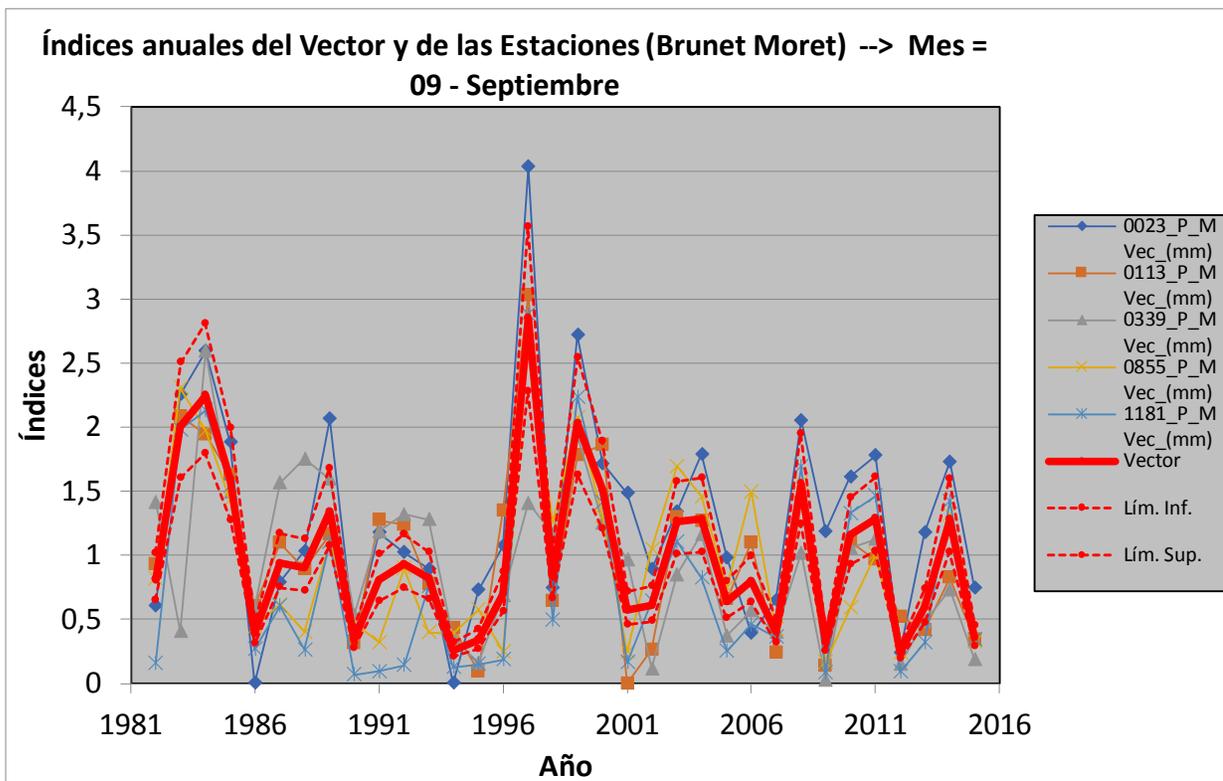
g) Julio



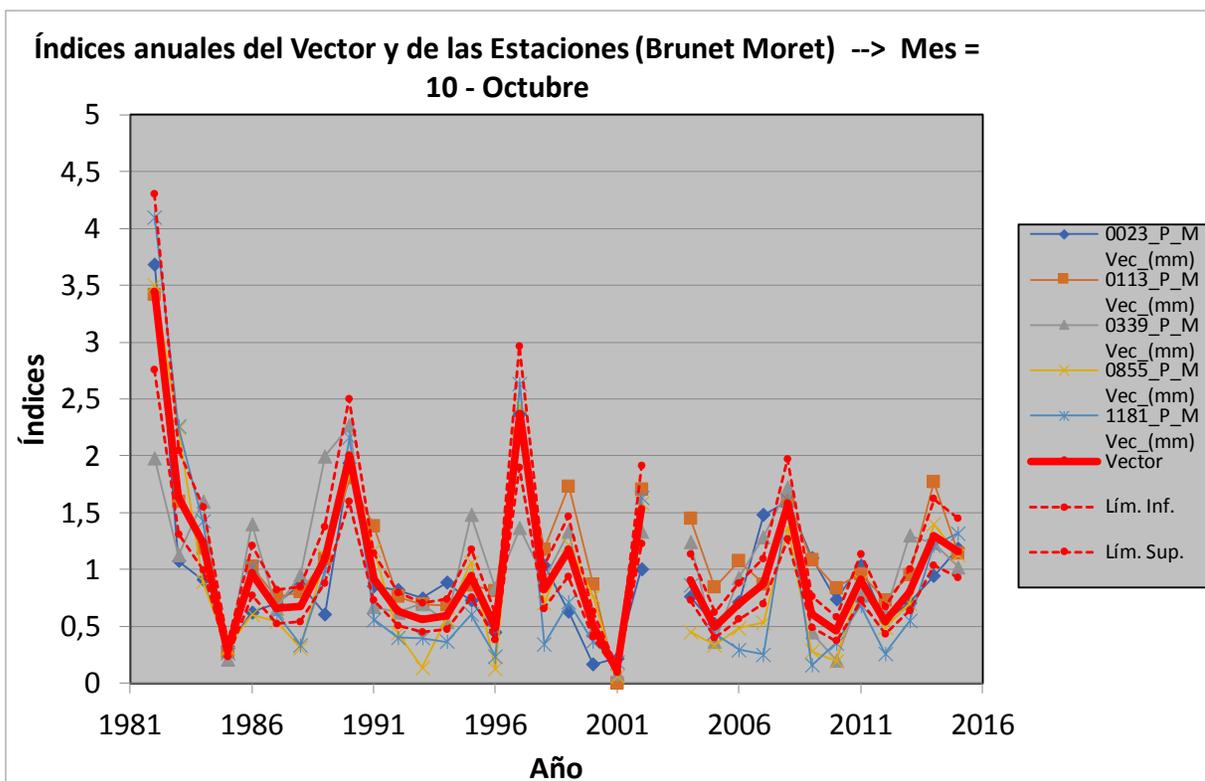
h) Agosto



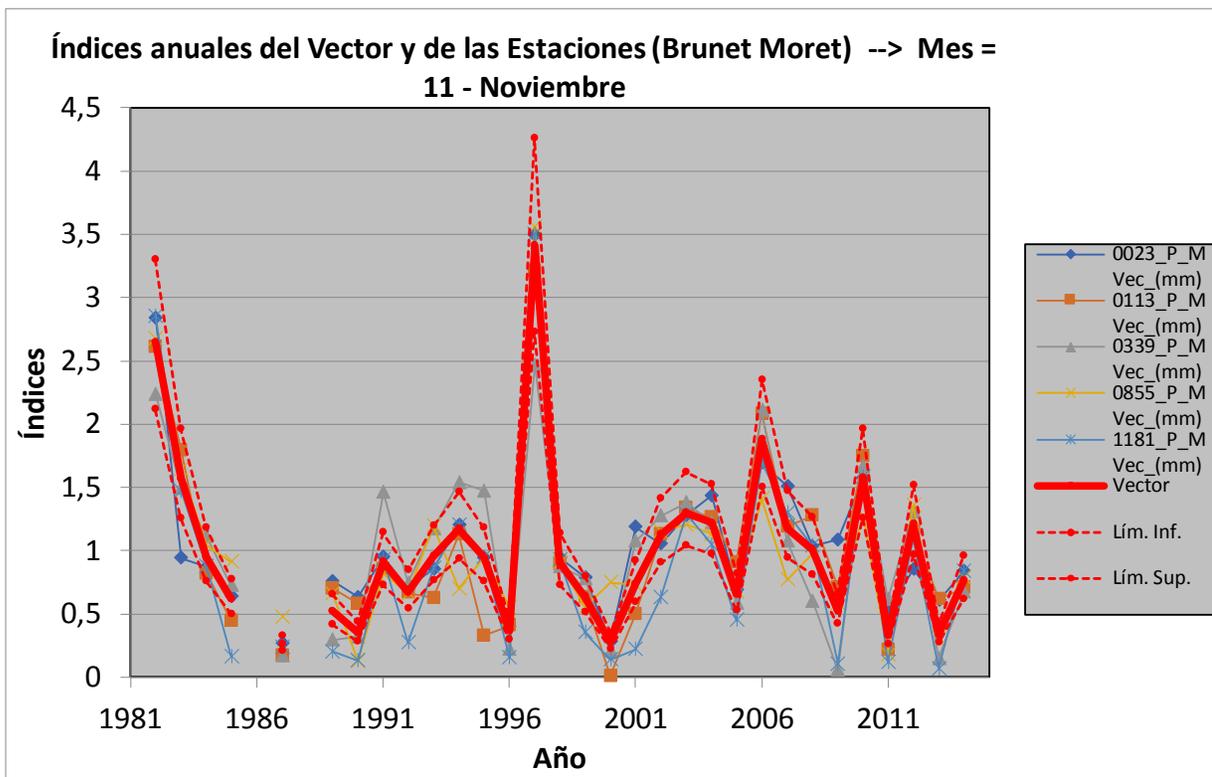
i) Septiembre



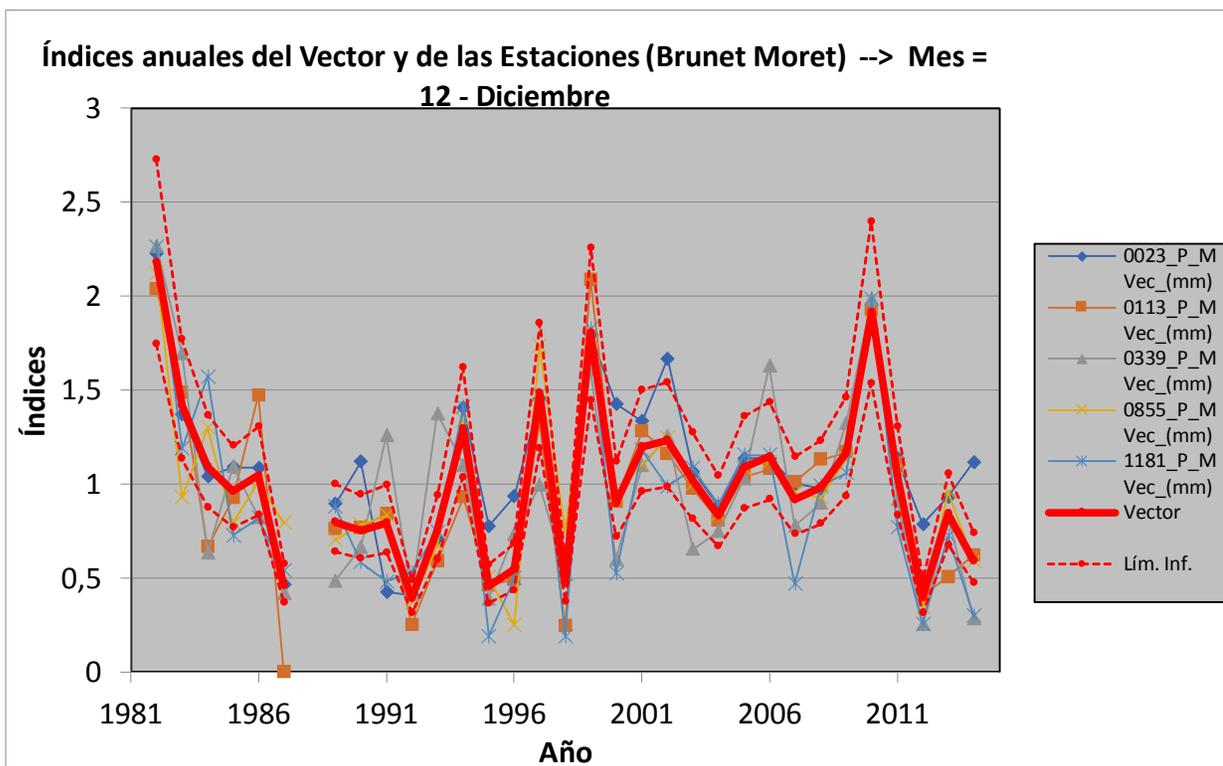
j) Octubre



k) Noviembre



l) Diciembre



Anexo 6: Distribución detallada del uso de suelo, tipo de suelo y pendiente de la Subcuenca del Río Guayllabamba

Detailed LANDUSE/SOIL/SLOPE distribution		SWAT model class		
Watershed		Área [ha]	Area[acres]	
Number of subbasins: 15		822344,1204	2032053,439	
LANDUSE:		Area [ha]	Area[acres]	% Wat.Area
Agricultural-Land- Generic	AGRL	14827,9687	36640,652	1,8
Agricultural-Land-Row Crops	AGRR	37213,7738	91957,0959	4,53
Agricultural Land-Close- grown	AGRC	7705,9956	19041,9004	0,94
Hay	HAY	71041,4233	175546,9091	8,64
Forest-Mixed	FRST	70322,1626	173769,5799	8,55
Forest-Deciduous	FRSD	130202,5548	321737,023	15,83
Forest-Evergreen	FRSE	124242,5969	307009,669	15,11
Wetlands-Forested	WETF	78282,2683	193439,399	9,52
Summer Pasture	SPAS	29213,1829	72187,2355	3,55
Range-Grasses	RNGE	298,9024	738,6027	0,04
Range-Brush	RNGB	7568,1732	18701,3343	0,92
Corn	CORN	25271,4619	62447,0459	3,07
Sweet Corn	SCRN	169069,3362	417778,7831	20,56
Eastern Gamagrass	EGAM	57084,32	141058,2089	6,94
SOILS:				
Bh3-3c-5411		224217,2513	554052,0388	27,27
I-Bh-c-5519		87346,676	215838,0037	10,62
I-Fh-Ne-T-5521		173179,0282	427934,0376	21,06
Th4-c-5670		80491,7338	198899,0988	9,79
Th7-a-5671		42620,7193	105317,9285	5,18
Tm1-a-5673		170384,6788	421029,0606	20,72
Tv2-b-5677		44104,033	108983,2708	5,36
SLOPE:				
0-8		148408,0339	366723,6722	18,05
8 - 30		374623,7102	925713,9191	45,56
30 >		299312,3763	739615,8474	36,4

Fuente: AcrSWAT (2012)