

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERIA
INGENIERÍA CIVIL**



TRABAJO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL:

**PRONÓSTICO HIDROLÓGICO DE LA CUENCA
HIDROGRÁFICA DEL RÍO QUIJOS PARA LA
OBTENCIÓN DEL CAUDAL DE APROVECHAMIENTO A
LA ALTURA DE LA ESTACIÓN HIDROLÓGICA H0719
MEDIANTE MODELACIÓN HIDROLÓGICA
UTILIZANDO EL SOFTWARE RS MINERVE**

AUTOR: RODRIGO JAVIER LOGROÑO VALENCIA

QUITO, MARZO 2021

DEDICATORIA.

Quiero dedicar mi tesis, principalmente, a mi madre Gladys quien es y ha sido la que me ha acompañado todos los días de mi carrera para conseguir el futuro con la profesión que me apasiona, mi padre Rodrigo que me ha acompañado incondicionalmente, mis hermanos Pablo y Paula ya que es un paso para el futuro que hemos planeado y a Solange que ha estado a mi lado gran parte de mi vida. ESTO ES PARA Y POR USTEDES.

Finalmente quiero dedicar a todas las personas que a diario persiguen sus sueños y pasiones y que sepan que “LA SUERTE ES AMIGA DE LA ACCIÓN”.

AGRADECIMIENTOS.

Agradezco profundamente a mi Madre Gladys y mi padre Rodrigo quienes me han apoyado incondicionalmente a lo largo de toda mi vida y especialmente mi carrera.

A mis hermanos: Pablo, Paula y Andrea que siempre me han dado el ánimo, felicidad y ejemplo que he necesitado para forjarme como profesional.

A mis amigos de vida: Solange, Alejandro y Hanshy porque nunca ha faltado una palabra de aliento en los momentos necesarios.

Agradezco también a mis compañeros de carrera, amigos y colegas: Diana, Tatiana, Germán principalmente que ahora los considero como mi familia y a mis demás amigos y amigas.

Agradezco a mi tutora y mentora, PhD. Patricia Garcés que me ha guiado durante todo el trayecto de mi tesis, y a los ingenieros y docentes Gonzalo Moya y Carlos Luis Navas, mis lectores y todos los demás docentes de los cuales fui pupilo durante mi carrera universitaria.

Agradezco también a los profesionales: Ingeniera Carolina Andrade, Ingeniero Ángel Torres y Javier Rueda que me compartieron sus conocimientos, enseñándome y ayudándome.

Y Agradezco profundamente de manera especial a los ingenieros Carlos Cárdenas y Natalia Horna y a todo el cuerpo de profesionales de la institución INAMHI que me abrieron sus puertas para desarrollar mi tesis.

A todos y todas ustedes de corazón, MUCHAS GRACIAS.

Contenido

1	Capítulo I: Generalidades.	8
1.1	Antecedentes.	8
1.2	Justificación.	9
1.3	Planteamiento del problema.	11
1.4	Objetivos.	12
1.4.1	Objetivo general.	12
1.4.2	Objetivos específicos.	12
2	Capítulo II: Marco teórico	13
2.1	Hidrología y su campo de estudio en una cuenca hidrográfica.	13
2.1.1	La cuenca hidrográfica y sus características físicas.	14
	Criterios de forma de una cuenca hidrográfica.	16
	Clasificación de las cuencas hidrográficas.	19
2.1.2	Ciclo hidrológico y sus fases.	21
2.2	Modelación hidrológica.	23
2.2.1	Clasificaciones de modelos hidrológicos.	24
2.3	Hidrogramas.	26
2.3.1	Hidrograma unitario.	27
2.3.2	Hidrograma para diferentes duraciones de lluvia.	28
2.3.3	Análisis de datos recopilados.	29
2.4	Software Rs Minerve y su aplicación en la hidrología.	31
2.4.1	Generalidades y alcances.	31
2.4.2	Fundamentos físicos e interfaz de RS Minerve.	32
2.4.3	Descripción de modelos hidrológicos de RS Minerve.	34
2.4.4	Ríos y/o canales en RS Minerve.	51
2.5	Simulación hidrológica.	52
2.5.1	Modelos hidrológicos de simulación: Generalidades.	52
2.5.2	Verificación de modelos hidrológicos de simulación.	52
2.6	Pronóstico hidrológico de caudales.	55
3	Capítulo III: Área de estudio y metodología.	57
3.1	Caracterización de la cuenca hidrológica del río Quijos.	57
3.1.1	Localización de la cuenca.	57
3.1.2	Características físicas de la cuenca.	59
3.1.3	Características meteorológicas e hidrológicas de la cuenca.	62
3.2	Tratamiento y análisis de datos.	67
3.2.1	Procesamiento de la información de datos meteorológicos.	67

3.2.2	Procesamiento de datos de caudal.	71
3.3	Aplicación del modelo GR4J en la cuenca del río Quijos.....	73
3.3.1	Generación de entradas para el modelo.	73
3.3.2	Modelación hidrológica de la cuenca del río Quijos en RS Minerve.....	81
3.3.3	Calibración de datos con la información de la estación hidrológica.	87
3.3.4	Validación de datos.....	95
4	Capítulo IV: Análisis de resultados.....	98
4.1	Determinación e interpretación de resultados.	98
4.2	Escenarios de comportamiento climático.	100
4.2.1	Escenario lluvioso.....	100
4.2.2	Escenario seco.	101
4.2.3	Comparación de escenarios.....	101
5	Capítulo V: Conclusiones y recomendaciones.....	103
5.1	Conclusiones.	103
5.2	Recomendaciones.	106
6	Bibliografía.	107
7	Anexos.	110

Índice de Figuras.

Figura 1: Representación de cuencas hidrográficas.	14
Figura 2: Cuenca Hidrográfica con valles extensos y cumbres escarpadas.	18
Figura 3: Cuenca hidrográfica con valles profundos y sabanas planas.	18
Figura 4: Tipo de curvas Hipsométricas.	19
Figura 5: Partes de una cuenca.	20
Figura 6: Ciclo Hidrológico.	22
Figura 7: Ejemplificación de Modelos hidrológicos según su distribución espacial.	26
Figura 8: Hidrograma del caudal en función del tiempo.	27
Figura 9: Captura de pantalla del área de trabajo de RS Minerve.	32
Figura 10: Interfaz del área de trabajo de RS Minerve.	33
Figura 11: Objeto V-Station.	34
Figura 12: Objeto SNOW-SD.	36
Figura 13: Objeto SMWW.	37
Figura 14: Objeto GSM.	37
Figura 15: Modelo GSM.	38
Figura 16: Objeto Socont.	39
Figura 17: Modelo SOCONT.	40
Figura 18: Objeto HBV.	41
Figura 19: Modelo HBV.	42
Figura 20: Objeto GR4J.	43
Figura 21: Modelo GR4J.	45
Figura 22: Objeto SAC-SMA.	48
Figura 23: Modelo SAC-SMA.	49
Figura 24: Ubicación de la cuenca del río Quijos.	57
Figura 25: Unidades Hidrográficas del Ecuador nivel 5 según la codificación Pfafstetter.	58
Figura 26: División de la Cuenca del río Quijos en subcuencas.	59
Figura 27: Cuenca del río Quijos con aforo en la estación H0719.	61
Figura 28: Captura de pantalla de la Base de datos de CLIMWAT.	65
Figura 29: Cálculo de ETP para la estación M0188 en Cropwat, con la estación más cercana de Climwat en Papallacta.	66
Figura 30: Cálculo de ETP para la estación M1124 en Cropwat, con la estación más cercana de Climwat, Napo.	66
Figura 31: Mapa de la cuenca del río Quijos.	67
Figura 32: Descripción de la tabla de atributos del Shapefile de subcuencas.	73
Figura 33: Descripción de la tabla de atributos del Shapefile de ríos.	73
Figura 34: Descripción de la tabla de atributos del Shapefile de puntos de salida de las subcuencas.	74
Figura 35: Herramienta GIS de RS Minerve.	74
Figura 36: Panel de configuración de objetos hidrológicos.	75
Figura 37: Asignación de objetos a los elementos de la cuenca.	76
Figura 38: Captura de pantalla del Modelo de la cuenca resultado de la herramienta GIS de RS Minerve.	77
Figura 39: Captura de pantalla de la importación de datos meteorológicos a la base de datos del modelo.	78
Figura 40: Selección del método TURC para el cálculo de la ETP en RS Minerve.	80
Figura 41: Incorporación de datos para el cálculo de evapotranspiración en RS Minerve.	80

Figura 42: Esquema resultante del modelo generado con los objetos conectados en RS Minerve.	81
Figura 43: Cuadro de edición de parámetros del modelo GR4J.....	82
Figura 44: Cuadro de edición de parámetros del río Kinematic Wave.....	84
Figura 45: Enlace de la base de datos con el modelo.	84
Figura 46: Menú solver de RS Minerve para correr el modelo.....	85
Figura 47: Incorporación de datos de caudales observados de la estación H0719 en RS Minerve.	88
Figura 48: Datos de caudales observados de la estación H0719.	88
Figura 49: Definición de la conexión entre el punto de salida y el objeto comparador.	89
Figura 50: Definición de la conexión entre el objeto source y el objeto comparador.....	89
Figura 51: Serie del objeto “Source”.	89
Figura 52: Incorporación de objetos “comparator” y “source” al modelo para la calibración. ..	90
Figura 53: Captura de pantalla de Interface de la herramienta Calibrator de RS Minerve.	91
Figura 54: Captura de pantalla de la Calibración de la cuenca del río Quijos con ETP calculada mediante RS Minerve.	92
Figura 55: Captura de pantalla de la Calibración de la cuenca del río Quijos con ETP incorporada en la base de datos.	94

Índice de tablas.

Tabla 1: Parámetros del objeto V-Station.....	35
Tabla 2: Parámetros del Modelo Snow-SD.	36
Tabla 3: Parámetros del objeto SMWW.	37
Tabla 4: Parámetros del modelo GSM.....	39
Tabla 5: Parámetros del Modelo SOCONT.....	41
Tabla 6: Parámetros del Modelo HBV.....	43
Tabla 7: Parámetros del Modelo GR4J.	45
Tabla 8: Valores de parámetros del modelo GR4J.....	46
Tabla 9: Parámetros del Modelo SAC-SMA.	50
Tabla 10: Parámetros de los ríos en RS Minerve.....	51
Tabla 11: Valores referenciales del criterio de Nash- Sutcliffe.	53
Tabla 12: Indicadores de la función objetivo en RS Minerve y su rango de valores.	54
Tabla 13: Selección de subcuencas	58
Tabla 14: Longitud de ríos.....	60
Tabla 15: Selección de estaciones Meteorológicas.	62
Tabla 16: Información disponible en la estación M0188.....	68
Tabla 17: Información disponible en la estación M1124.....	68
Tabla 18: Tabla de historial de colores.	69
Tabla 19: Estado de datos de precipitación en la estación M0188.	69
Tabla 20: Estado de datos de precipitación en la estación M1124.	70
Tabla 21: Estado de datos de Temperatura en la estación M0188.....	70
Tabla 22: Estado de datos de Temperatura en la estación M1124.....	71
Tabla 23: Información disponible en la estaciones hidrológicas.....	72
Tabla 24: Tabla de historial de colores.	72
Tabla 25: Disponibilidad de datos hidrológicos.	72
Tabla 26: Formato de ingreso de datos a la Base de datos de RS Minerve.....	77
Tabla 27: Tabla para el coeficiente K para la de Strickler.	83

Tabla 28: Valores resultantes de los parámetros de GR4J.	93
Tabla 29: Valores resultantes de los indicadores de la FO.	93
Tabla 30: Valores resultantes de los parámetros de GR4J.	94
Tabla 31: Valores resultantes de los indicadores de la FO.	95
Tabla 32: Resultados finales de los indicadores de la validación.	96
Tabla 33: Resultados finales de los indicadores de la validación.	97
Tabla 34: Tabla de comparación de escenarios.	102

Índice de gráficos.

Gráfico 1: Curva Hipsométrica de la cuenca del río Quijos con aforo en la estación H0719. ..	61
Gráfico 2: Precipitación media multianual (mm/año) en la Cuenca del río Quijos.	63
Gráfico 3: Temperatura multianual en °C.	64
Gráfico 4: Datos de precipitación de la estación M0188.	78
Gráfico 5: Datos de temperatura de la estación M188.	79
Gráfico 6: Datos de Evapotranspiración de la estación M188, calculada a partir de CROPWAT 8.0.	79
Gráfico 7: Datos de precipitación de la estación M1124.	79
Gráfico 8: Datos de temperatura de la estación M1124.	79
Gráfico 9: Datos de Evapotranspiración de la estación M1124, calculada a partir de CROPWAT 8.0.	80
Gráfico 10: Resultado del Caudal de aforo de la cuenca Quijos con ETP calculada mediante RS Minerve.	86
Gráfico 11: Resultado del Caudal de aforo de la cuenca Quijos con ETP incorporada en la base de datos.	87
Gráfico 12: Resultado de la calibración con ETP calculada mediante RS Minerve.	93
Gráfico 13: Resultado de la calibración con ETP calculada mediante Cropwat.	95
Gráfico 14: Resultado final de la validación con ETP calculada mediante RS Minerve.	96
Gráfico 15: Resultado final de la validación con ETP calculada mediante Cropwat.	97
Gráfico 16: Escenario lluvioso.	100
Gráfico 17: Escenario seco.	101

1 Capítulo I: Generalidades.

1.1 Antecedentes.

A través de la historia de la humanidad, el ser humano siempre ha estado lleno de curiosidad y se ha interrogado acerca del medio ambiente donde vive. Con este deseo y curiosidad de conocer la naturaleza, la noción de un ciclo hidrológico y su comportamiento se desarrolló desde épocas muy tempranas (Sanchez, 1974).

En los últimos años se han desarrollado nuevas metodologías para la predicción de caudales en base a avances tecnológicos, lo que se ha convertido en un gran desafío para hidrólogos e investigadores del área. La creciente demanda por investigaciones en este ámbito tiene un enfoque en el uso de datos hidrológicos y meteorológicos para el estudio y la elaboración de modelos que posibiliten el acceso a simulaciones correctas y aproximadas a la realidad, con la finalidad de emitir un pronóstico adecuado. (Mendoza, 2010).

Existen organismos que se dedican al pronóstico hidrológico en distintos países, como por ejemplo las entidades gubernamentales de IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales) en Colombia, SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología) en Perú y el INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología) en el Ecuador.

En la presente investigación se busca obtener y analizar resultados de una modelación hidrológica mediante el uso del software RS Minerve, con el fin de pronosticar el caudal de aprovechamiento a la altura de la estación hidrológica H0719 QUIJOS DJ OYACACHI, que pertenece a la cuenca hidrográfica del río Quijos, simulación que se realizará con la información meteorológica e hidrológica de estaciones cercanas y/o pertenecientes a la zona en estudio.

Para la aplicación del software RS Minerve se requiere previo conocimiento de una base teórica de hidrología y modelación hidrológica, además de programas con sistema de información geográfica y aplicaciones con base de datos climáticos que permitan el cálculo de necesidades hídricas.

1.2 Justificación.

La modelación hidrológica se ha convertido actualmente en un instrumento de gran importancia dentro del campo de la hidrología, siendo la herramienta principal para el estudio de cuencas hidrográficas a partir de varias funciones como; realizar análisis, crear sistemas de información y pronosticar eventos hidrológicos.

Por lo tanto, la investigación corresponde al área de hidrología y busca ser una breve introducción al uso del software RS MINERVE, que realiza análisis hidrológico e hidráulico. Además del uso de otros programas que permiten ayudar y complementar el desarrollo de una modelación hidrológica.

El uso del software RS Minerve se ha extendido desde países como Suiza, Francia, España, Nepal hasta países vecinos como Perú, Brasil, Bolivia. Por este motivo la presente tesis se sustenta en el uso y aplicación del software RS Minerve en cuencas hidrográficas ecuatorianas y los beneficios que puede aportar en investigaciones en el campo de la hidrología para nuestro país y así tener un medio para conocer las capacidades hídricas de las cuencas hidrográficas del Ecuador que es importante en la Ingeniería Civil, tomando en cuenta que los estudios hidrológicos forman parte de los estudios de factibilidad para la evaluación y ejecución de cualquier obra o proyecto.

También, la modelación hidrológica permite pronosticar caudales, que tiene la función de mitigar los riesgos y daños que pueden provocar los llamados eventos extremos (crecidas y sequías), así también prevenir pérdidas económicas, ambientales y sobre todo humanas. Razón por la cual, el análisis o estudio de los modelos hidrológicos son una herramienta que nos permite una mejora para la gestión del agua en las zonas donde se lleva a cabo el estudio.

El modelamiento se realiza obteniendo el caudal que ingresa por captación y que antes pasa por la estación hidrológica H0719 del INAMHI que es un dato importante para el diseño, operación y gestión de aguas la central Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair abordando el estudio en una zona geográfica de alto impacto de beneficios hídricos para el país.

El presente trabajo se realizará con los datos del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (**INAMHI**), que es la entidad pública de carácter científico y técnico, dependiente de la “Secretaría Nacional de agua”, encargada de manejar y normar el sector hidro-meteorológico nacional, con el fin de generar productos científico-técnicos de calidad. (INAMHI, s.f.).

1.3 Planteamiento del problema.

La tesis se basa en la implementación del RS Minerve como herramienta para estudios hidrológicos en el Ecuador. Su uso y resultados se verificarán a través del modelamiento hidrológico de la cuenca del río Quijos ubicada en el oriente ecuatoriano por ser una zona que posee varios estudios, datos e información que facilitan el análisis e investigación. Por lo tanto, el problema surge en cómo se debe realizar el procedimiento de la investigación, recopilación de datos, información y la adecuación de RS Minerve a la realidad de la zona en estudio con el fin de obtener resultados (hidrogramas) aproximados a la realidad y una metodología que permita ser replicada en futuros proyectos hidrológicos y diferentes zonas de estudio.

1.4 Objetivos.

1.4.1 Objetivo general.

Elaborar la modelación hidrológica de la cuenca hidrográfica del río Quijos para la obtención de los hidrogramas que se generan por el caudal de ingreso a la estación hidrológica H0719 DJ QUIJOS OYACACHI mediante el uso del software RS MINERVE.

1.4.2 Objetivos específicos.

- Revisar las bases teóricas relacionadas a la modelación hidrológica de cuencas e introducir bases prácticas de modo que se pueda implementar en la elaboración y operación en un modelo hidrológico completo e interpretar los resultados.
- Caracterizar la cuenca hidrográfica de manera que se pueda analizar y reconocer los diferentes factores y variables hidrológicas que intervienen para el estudio, y a su vez el procesamiento de la información necesaria para la modelación hidrológica.
- Realizar la modelación hidrológica de la cuenca en estudio mediante el software RS MINERVE, aplicando los conocimientos adquiridos para el pronóstico de caudales, y obtener datos confiables mediante la validación de la información obtenida y procesada, tomando en cuenta la procedencia de los datos y las diferentes herramientas para su tratamiento.
- Generar hidrogramas que representen el caudal de ingreso a la estación hidrológica H0719 e interpretar los resultados calculados.

2 Capítulo II: Marco teórico

2.1 Hidrología y su campo de estudio en una cuenca hidrográfica.

Hidrología tiene su origen en el vocablo griego *hydro* que significa agua y logos que significa estudio, tratado o ciencia y es la ciencia que estudia la distribución del agua espacial y temporal en la Tierra, su ocurrencia y la relación con el medio ambiente. Hidrología se refiere también a la distribución del agua en nuestro planeta, al estudio de aguas subterráneas, aguas continentales, de las precipitaciones y por último estudia la humedad proveniente del suelo denominado escurrimiento.

El estudio de la hidrología permite tener el conocimiento del comportamiento de los cuerpos de agua como: ríos, lagos o determinadas zonas acuíferas, conocimiento el cual ayuda a la predicción y prevención de eventos extremos como crecidas o inundaciones y sequías, y los desastres que ocasionan estos fenómenos. Las consecuencias de los desastres están directamente ligadas a la gestión de riesgos que cada país o región, poseen para estos fenómenos, los cuales se pueden prevenir con la ayuda del estudio de la hidrología (Ordoñez, 2011).

El destino que tiene la hidrología es conocer y aplicar de manera adecuada los fundamentos teóricos y prácticos de esta ciencia para la solución de problemas dentro del campo de la Ingeniería Civil, como por ejemplo: el pronóstico del tiempo para la definición de etapas de construcción, la planeación de diseño de corrientes para una infraestructura vial, diseños en caso de crecidas para obras hidráulicas y obras de prevención para mitigar las consecuencias de eventos extremos como: inundaciones, sequías, entre otras.

El autor Ucha (2013) manifiesta al respecto que: En la actualidad, la hidrología ha cobrado un papel sustancial en lo que respecta al planeamiento de la utilización de los recursos hidráulicos y por caso es imprescindible su presencia cuando en ingeniería se planean obras que se hallan vinculadas al suministro del agua. Entonces, para el diseño de obras hidráulicas es recurrente el uso de modelos matemáticos que se encargarán de representar el comportamiento de una cuenca, por ejemplo. (Ucha, 2013)

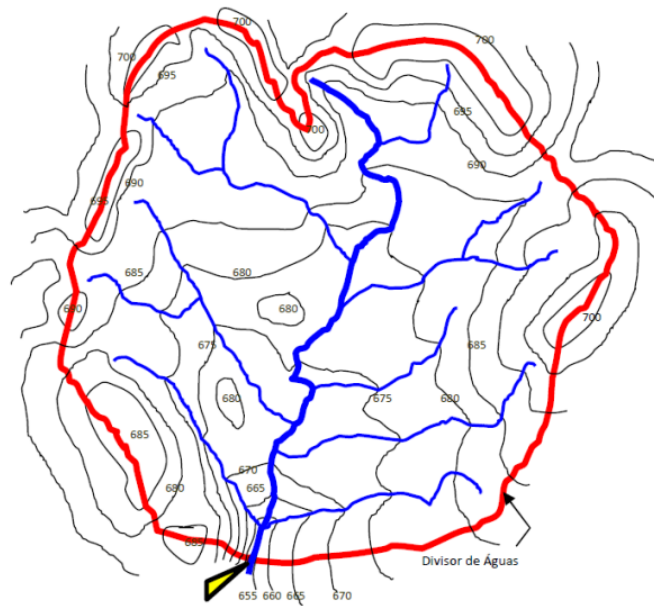
2.1.1 La cuenca hidrográfica y sus características físicas.

Monsalve (2008) menciona que “La cuenca hidrográfica es un área definida topográficamente, drenada por un curso de agua o un sistema conectado de curso de agua, de modo que el caudal efluente se descarga a través de una salida simple.” (Monsalve, 2008, p.33).

Torres y Aragón (2018) definen a la cuenca como un área física debidamente delimitada, donde las aguas superficiales y subterráneas vierten a una red natural mediante uno o varios cauces de caudal continuo o intermitente, los cuales confluyen en un río principal, en un depósito natural de aguas, o directamente al mar, que puede considerarse como un sistema de drenaje. (Torres & Aragón, 2018).

La representación gráfica de una cuenca hidrográfica se esquematiza como se observa en la figura 1.

Figura 1: Representación de cuencas hidrográficas.



Fuente: Palma, 2016.

2.1.1.1 Caracterización de una cuenca hidrográfica mediante la codificación Pfafstetter.

La codificación Pfafstetter es un sistema que permite describir la topología de una cuenca hidrográfica, caracterizando la anatomía regional de la misma como una red de drenaje en el área o superficie de la cuenca, en el documento emitido por la SENAGUA (Jurado et al., 2009) describe que la metodología Pfafstetter asigna identificadores a una unidad

hidrográfica para relacionarla con sus unidades internas locales y con las unidades colindantes.

El sistema Pfafstetter es jerárquico y las unidades que se delimitan son desde las uniones de los ríos confluentes. El nivel 1 de jerarquía corresponde a la escala continental de unidades de drenaje, los niveles sucesivos (2, 3, 4, ect.) representan los mosaicos cada vez más finos de la topografía del terreno en unidades de drenaje más pequeñas denominadas sub unidades de niveles inferiores de la red de drenaje.(Aguirre et al., 2005). El proceso para codificar consiste en subdividir una cuenca hidrográfica, determinando el río principal y sus cuatro afluentes mayores. Las cuencas con dígitos pares corresponden a los ríos tributarios en sentido desde la desembocadura hacia la naciente del río principal, mientras que los dígitos impares corresponden a los otros tributarios del río principal denominados intercuenas. (Aguirre et al., 2005).

2.1.1.2 Características geomorfológicas de una cuenca hidrográfica.

La caracterización de una cuenca se inicia con la delimitación de su territorio, la forma, tamaño o área, pendiente media y pendiente del cauce principal, red de drenaje, etc. Algunos de estos “parámetros geomorfológicos” sirven de base para identificar la vulnerabilidad y considerar peligros a los desastres naturales que puedan ocurrir dentro de la cuenca. (Ordoñez, 2011, p.17).

Área de drenaje de una cuenca hidrográfica.

Para Monsalve (2008) el área de drenaje es “*el área plana (proyección horizontal) incluida entre su divisoria topográfica*”.(Monsalve, 2008).

Además, Tucci (como se ha citado en Palma Trujillo, 2016), menciona que el área de una cuenca es fundamental para definir el potencial de generación de escurrimiento de la cuenca hidrográfica, una vez que su valor multiplicado por la lámina de la lluvia precipitada define el volumen de agua recibido por la cuenca. (Palma, 2016).

El área de una cuenca hidrográfica generalmente se expresa en hectáreas (ha) o en kilómetros cuadrados (km²) como unidad de medida.

Longitud del río principal.

Se define como el largo del río principal y es determinado a partir del perfil longitudinal del curso de agua, que se mide desde el largo del trecho entre la naciente más distante y el punto de interés final o exutorio. (TUCCI, 2004).

Pendiente de la cuenca hidrográfica.

La pendiente de una cuenca hidrográfica controla en parte la velocidad de la escorrentía superficial, afectando el tiempo que lleva el agua de las precipitaciones a concentrarse en los lechos fluviales que conforman la red de drenaje de las cuencas hidrográficas. Para obtener el valor representativo de la pendiente de los terrenos de una cuenca es de determinar una distribución porcentual de las pendientes por medio de estadística. (Monsalve, 2008).

Para Ordoñez (2011) otra forma de representar el valor de la pendiente de una cuenca es: “obteniendo la diferencia total de la altitud mayor del cauce y la altitud menor del cauce, entre la longitud horizontal del curso de agua entre esos dos puntos” (Ordoñez, 2011, p. 24).

Criterios de forma de una cuenca hidrográfica.

Los factores para la caracterización son:

Factor de compacidad (Kc).

El coeficiente de compacidad o índice de Gravelius es el factor que relaciona el perímetro de la cuenca hidrográfica en estudio y la longitud de un círculo de área equivalente al área de la cuenca. (Monsalve, 2008).

Monsalve define que el valor mínimo del coeficiente de compacidad es uno y la cuenca tiene mayor tendencia a las crecientes a medida que este valor numérico sea próximo a la unidad.

$$Kc = \frac{P}{2\pi \left(\frac{A}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}}}$$
$$Kc = 0.28 * \frac{P}{A^{1/2}}$$

Donde:

P: perímetro de la cuenca (km).

A: área de drenaje de la cuenca (km²).

Por consiguiente se deduce que mientras el coeficiente Kc aumenta, será mayor la irregularidad de la cuenca en análisis.(Horna, 2016).

Factor de forma (Kf).

En mención al coeficiente o factor de forma Monsalve define la relación entre el ancho medio y la longitud axial de la cuenca. La longitud axial de la cuenca es medida según el curso de agua más largo, es decir desde la desembocadura hasta la cabecera más distante de la cuenca, y con respecto al ancho medio se mide a partir de cuándo se divide el área por la longitud axial de la cuenca. (Monsalve, 2008).

$$Kf = \frac{B}{L} \qquad B = \frac{A}{L}$$

Reemplazando, se obtiene:

$$Kf = \frac{A}{L^2}$$

Donde:

B: ancho medio de la cuenca (km).

L: longitud axial de la cuenca (km).

A: área de drenaje (km²).

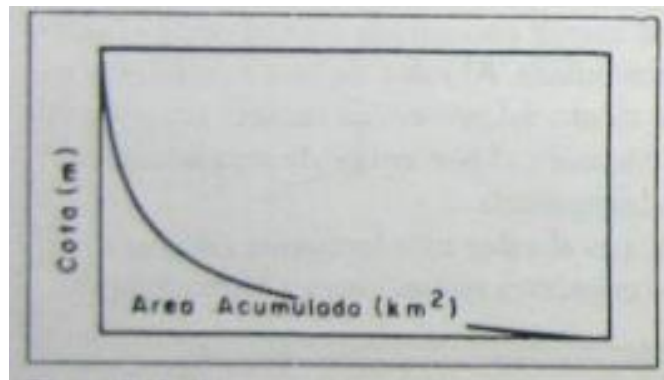
Una cuenca hidrográfica con un factor de forma bajo esta menos sujeta a crecientes que otra del mismo tamaño pero con mayor factor de forma.(Monsalve, 2008).

Curva hipsométrica.

La curva hipsométrica relaciona la superficie de la cuenca con el porcentaje de área que tiene en cada franja de longitud. Monsalve describe a la curva hipsométrica como una representación gráfica del relieve de una cuenca hidrográfica y es el estudio de la variación de la elevación de varios terrenos de la cuenca con referencia al nivel medio del mar.(Monsalve, 2008).

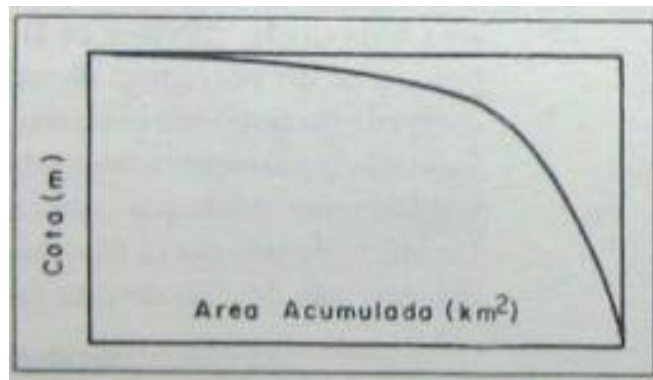
Las curvas hipsométricas permiten definir características fisiográficas de las cuencas. Entre las cuales se pueden diferenciar una cuenca con valles extensos y cumbres abruptas o una cuenca con valles profundos y sabanas planas como se muestra en las figuras número 2 y 3 respectivamente. (Monsalve, 2008).

Figura 2: Cuenca Hidrográfica con valles extensos y cumbres escarpadas.



Fuente: (Monsalve, 2008).

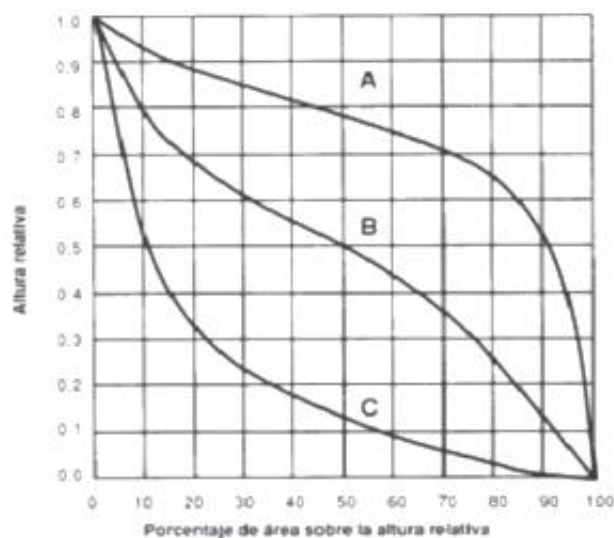
Figura 3: Cuenca hidrográfica con valles profundos y sabanas planas.



Fuente: (Monsalve, 2008).

De forma similar la figura 4 refleja las fases de estabilidad e inestabilidad de las cuencas, donde se muestra la altura relativa en el eje de las ordenadas y el porcentaje de área acumulada perteneciente a la altura relativa en las abscisas.

Figura 4: Tipo de curvas Hipsométricas.



Fuente: (A. Andrade, 2016).

De la figura 4, las curvas representan:

- La curva tipo A es el resultado de una cuenca hidrográfica joven, teniendo un alto poder erosivo, y los ríos poseen velocidades de flujo altas desde el punto de vista ingenieril.
- La curva tipo B es el resultado de una cuenca en equilibrio, es decir son ríos maduros, es decir no existe en su mayoría presencia de sedimentación ni erosión, estos ríos suelen ser considerados para obras de aprovechamiento hidráulico.
- La curva tipo C es el resultado de ríos con etapa de vejez, la cuenca hidrográfica es netamente sedimentaria, por lo que son cuencas con alta probabilidad de inundación.

Clasificación de las cuencas hidrográficas.

Según ciertos aspectos fisiográficos, las cuencas hidrográficas se pueden clasificar:

Según su tamaño geográfico:

- Cuencas hidrográficas grandes: La extensión de área que representan estas cuencas son mayores a 500 hectáreas.
- Cuencas hidrográficas medianas: Son aquella cuya extensión va representada de 500 a 50 hectáreas de área.
- Cuencas hidrográficas pequeñas: Son aquellas cuencas hidrográficas que poseen una extensión de hasta 50 hectáreas y también se las conoce como micro cuencas.

Según la evacuación de sus aguas:

Dependiendo de los aspectos fisiográficos de las cuencas se pueden clasificar también por la forma de la cuenca que viene determinado por las condiciones físico-geológicas del terreno. (Torres & Aragón, 2018).

- **Endorreicas:** El punto de salida de la cuenca está dentro de los límites de la misma. (Torres & Aragón, 2018). Son cuencas hidrográficas que tienen su desembocadura en lagos o lagunas.
- **Arréicas:** Generalmente son cuencas hidrográficas que representan a ríos efímeros, las aguas de esta cuenca se acumulan y se evaporan o infiltran en el terreno, por lo cual no desaguan en ningún cuerpo de agua. (Torres & Aragón, 2018).
- **Exorreicas:** El origen de estas cuencas generalmente se da en el alta de una montaña o nevado y su desembocadura está en el mar u alguna otra corriente, el punto de salida se encuentra en el límite de la cuenca. (Torres & Aragón, 2018).

Partes de una cuenca.

Torres & Aragón (2018) definen que las partes físicas de una cuenca hidrográfica como se ve representado en la figura 5.

Figura 5: Partes de una cuenca.



(Torres & Aragón, 2018)

Parte alta de la cuenca o de recepción.

Esta zona de la cuenca es la productora de agua, que suele estar conformada de altas montañas, en esta parte de la cuenca hidrográfica se caracteriza generalmente por altos niveles de pluviosidad y cauces de ríos con alta velocidad en su flujo ocasionado por sus

pronunciadas pendientes. Los autores de “Investigación en Hidrología General, Isotópica Y Aplicada”, Torres & Aragón (2018) señalan que en estas zonas es de vital importancia la conservación de bosques, ya que estos son los reguladores del agua. (Torres & Aragón, 2018).

Parte media de la cuenca.

Esta característica se determina a partir de la “curva hipsométrica”, que representa la distribución de zonas altas, medias y bajas en la cuenca. Usualmente se emplea en conjunto con los registros pluviométricos para sectorizar zonas de diferente pluviosidad y estimar las relaciones elevación vs pluviosidad en la cuenca. (Torres & Aragón, 2018).

Parte baja de la cuenca.

La parte baja de la cuenca se conforma generalmente de material extraído de la parte alta, esta parte representa muchas veces el desemboque a otros cuerpos de agua como ríos o bien el mar. El material que se deposita se lo denomina como de deyección. (Torres & Aragón, 2018).

2.1.2 Ciclo hidrológico y sus fases.

Chow en Hidrología Aplicada (1994) define que: “El ciclo hidrológico es el foco central de la hidrología, lo considera de forma continua o sea que no tiene principio ni fin en la ocurrencia de sus procesos del agua que circula a través de la hidrósfera” (Chow et al., 1994).

La figura 6 indica el proceso del ciclo hidrológico que empieza con la evaporación del agua de los océanos y la superficie terrestre que se convertirá en parte de la atmósfera donde el agua se condensa y precipita sobre los océanos y superficie de la Tierra, cumpliéndose la condición asignada de no tener un principio y fin, en otras palabras, es continua.

El agua precipitada es interceptada por la vegetación de las zonas y se transforma en flujo superficial sobre el suelo de las zonas y otra cantidad se infiltra a través del suelo como flujo sub superficial y que posteriormente se descarga en ríos como escorrentía superficial, estos cuerpos de agua terminan siendo parte del ciclo hidrológico ya que gran parte de está regresa a la atmosfera por la evaporación.

El agua infiltrada puede percolar profundamente para recargar el agua subterránea de donde emerge en manantiales o se desliza hacia ríos para formar la escorrentía superficial,

finalmente fluye hacia el mar o se evapora en la atmósfera a medida que el ciclo hidrológico continúa. El análisis del flujo y almacenamiento de agua en el balance global de agua da una visión de la dinámica del ciclo hidrológico.(Chow et al., 1994).

Figura 6: Ciclo Hidrológico

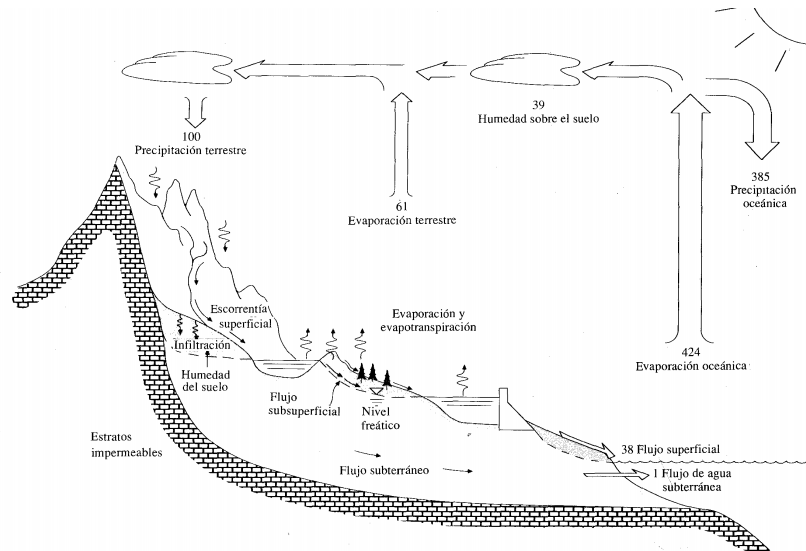


FIGURA 1.1.1 El ciclo hidrológico con un balance de agua promedio global anual en unidades relativas a un valor de 100 para la tasa de precipitación terrestre.

Fuente: (Chow et al., 1994).

Fases del ciclo hidrológico.

Precipitación.

Precipitación se denomina a cualquier producto de la condensación del vapor agua atmosférico depositada en la superficie del planeta, también se puede entender la precipitación como cualquier agua meteórica recogida de la superficie de la Tierra. De este proceso Marcano (2009) se refiere: “El agua que precipita en tierra puede tener varios destinos. Una parte es devuelta directamente a la atmósfera por evaporación; otra parte escurre por la superficie del terreno, escorrentía superficial, que se concentra en surcos y va a originar las líneas de agua. El agua restante se infiltra, esto es penetra en el interior del suelo; esta agua infiltrada puede volver a la atmósfera por evapotranspiración o profundizarse hasta alcanzar las capas freáticas.” (Marcano,2009).

Evapotranspiración.

La cantidad de agua movida, dentro del ciclo hidrológico, por el fenómeno de sublimación es insignificante en relación a las cantidades movidas por evaporación y por transpiración, cuyo proceso conjunto se denomina evapotranspiración (Marcano,2009).

La evapotranspiración depende de varias ecuaciones que permiten su cálculo y la elección de estas depende de las condiciones y disponibilidad de datos, de la misma manera los datos necesarios dependerán del uso que se desea obtener como se menciona en Linsley et al. (Iparraguirre & Bramont, 2015).

La evapotranspiración potencial que fue propuesta por Turc en los años de 1955 a 1961 está representada por la siguiente ecuación.

$$ETP = CoeffETP * K * \frac{T}{T + 15} * (R_g + 50) \quad si T > 0$$

$$ETP = 0 \quad si \leq 0$$

Donde:

ETP: evapotranspiración potencial (mm/mes).

T: temperatura (°C).

R_g: radiación global (cal/cm²/día).

K: constante, K=0.4 si el mes es febrero, de lo contrario K=0.37.

Escorrentía.

Es la cantidad de agua que lleva una corriente de agua o flujo, también puede ser denominada como cantidad o nivel de una determinada sustancia que pasa por un cierto lugar durante un cierto periodo de tiempo. Siendo en hidrología el caudal al volumen de agua que circula por el cauce de un río, canal o lugar determinado. (Torres & Aragón, 2018).

2.2 Modelación hidrológica.

Los modelos hidrológicos constituyen una representación de un sistema con el fin de reproducir sus respuestas frente a diferentes entradas como precipitaciones extremas, modificaciones en el uso del suelo, cambio climático, etc. Todos los modelos hidrológicos son aproximaciones de la realidad, por lo que resulta muy difícil conseguir la

consideración simultánea de las fuentes de variación: aleatoriedad, dimensiones espaciales y tiempo. (Chow et al., 1994).

De acuerdo con Gonzales M. (1989) Las modelaciones hidrológicas dependen del problema a tratar. En general, se describe cualquier subsistema del ciclo hidrológico como un sistema y se representa en forma de modelo estocástico o determinístico; en ambos casos se puede realizar simulación en computador dependiendo del modelo propuesto. (González M., 1989).

2.2.1 Clasificaciones de modelos hidrológicos.

2.2.1.1 Clasificación de modelos de acuerdo a la conceptualización de los procesos básicos.

La clasificación de modelos matemáticos hidrológicos según Gossain et. al. Se divide en tres sub clasificaciones, *empírica* o *black box* (caja negra), *conceptual* o *grey box* (caja gris) o *determinístico*.

El modelo matemático *empírico* o *black box* funciona como una relación entrada-salida calibrada. Este tipo de modelos no poseen una base física ya que no hay descripción del comportamiento causado por los procesos simplificados o individuales basados en observaciones experiencia, teoría etc. Entre estos modelos se puede destacar los modelos estocásticos de series de tiempo o el método de la curva número que permite el cálculo de caudales.

Los modelos *grey box* se dividen en modelos *agregados* o *Lumped*, *semi-distribuidos* y *distribuidos*. Estos modelos se utilizan cuando se toman en cuenta los procesos internos del modelo, considerando leyes físicas de manera simplificada, un ejemplo de estos modelos es el modelo HBV (contenido en RS Minerve).

La importancia de destacar esta sub clasificación es porque contiene a los modelos *semi-distribuidos*, mismos que son la base del software RS Minerve.

El modelo hidrológico *agregado* o *lumped* toma a la cuenca hidrográfica como una unidad. Los parámetros son constantes en el espacio.

El modelo *distribuido* posee una división e malla que pueden ser rectangulares, posee variabilidad espacial en los parámetros que posee y la precipitación e interactúa con los procesos hidrológicos internos.

Finalmente, el modelo hidrológico *semi-distribuido* el cual está basado el software RS Minerve, divide en sub-cuencas a los cauces del río principal, se caracteriza por variabilidad espacial de parámetros y precipitación y permite el cálculo de los procesos hidrológicos, todo esto a nivel de sub cuencas a su vez posee facilidad para la incorporación de estructuras hidráulicas.

2.2.1.2 Clasificación de modelos de acuerdo su representación espacial.

Otra forma de clasificar a los modelos hidrográficos es según su representación espacial mencionada por (Tellez, 2016) en los cuales agrupa a los modelos en tres grupos Modelos agregados, modelos distribuidos y modelos semi-distribuidos. La caracterización para este tipo de clasificación posee similitudes con las caracterizaciones en las clasificaciones previas.

Modelos agregados.

Entre las principales limitaciones que se encuentra en una modelación de cuencas hidrográficas se refleja por la falta de información de las propiedades que el suelo de la zona de estudio posee, y los procesos de flujos tanto superficiales como subterráneos que existen. Tellez A. menciona que esta limitación se puede superar asumiendo que el suelo de la cuenca es homogéneo, a su vez se asume para los procesos involucrados de flujos. Esta afirmación es válida para cuencas pequeñas, considerando a una cuenca pequeña como un todo, donde los parámetros son constantes en el espacio. (Tellez, 2016).

Modelos distribuidos.

Con el fin de tener una mayor representatividad de la cuenca, los modelos distribuidos la discretizan en un gran número de elementos pequeños regulares e irregulares, grillas o mallas donde el flujo de agua va pasando de un punto o nodo hacia el siguiente y así el agua drena por toda la cuenca, teniendo variabilidad espacial de parámetros, variables y resultados, permitiendo así interacción entre los diferentes procesos en cada una de las celdas generadas.(Tellez, 2016).

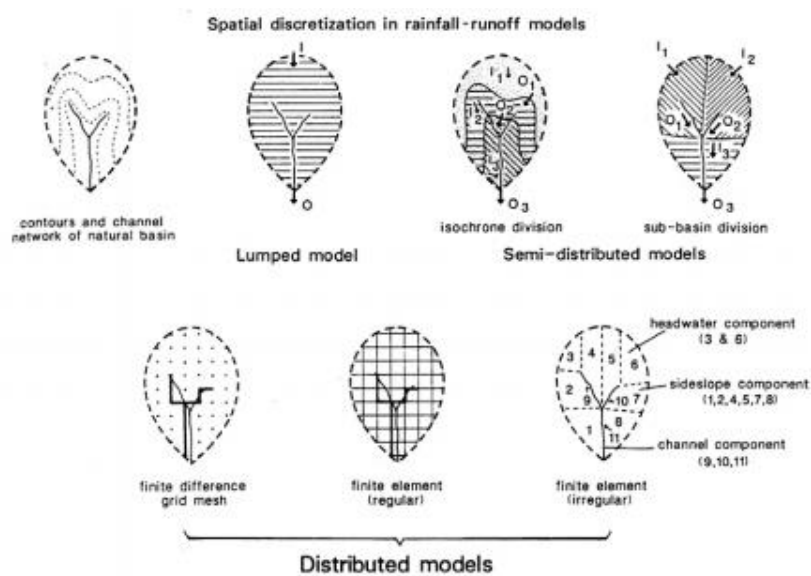
Modelos semi-distribuidos.

Cuando una cuenca hidrográfica ya no se considera pequeña o microcuenca, no es viable una considerar parámetros constantes ni asumir homogeneidad, entonces se procede a analizar de manera independiente zonas con similar comportamiento hidrológico.

Tellez considera que los modelos semi-distribuidos son un término medio entre sus clasificaciones antecesoras, los modelos agregados y distribuidos (como se menciona anteriormente). La estructura de los modelos semi-distribuidos poseen una mejor base física que los modelos agregados y posee una menos cantidad de datos que los modelos distribuidos.(Tellez, 2016).

Se puede diferenciar la división de estos modelos en la figura 7 mostrada a continuación.

Figura 7: Ejemplificación de Modelos hidrológicos según su distribución espacial.



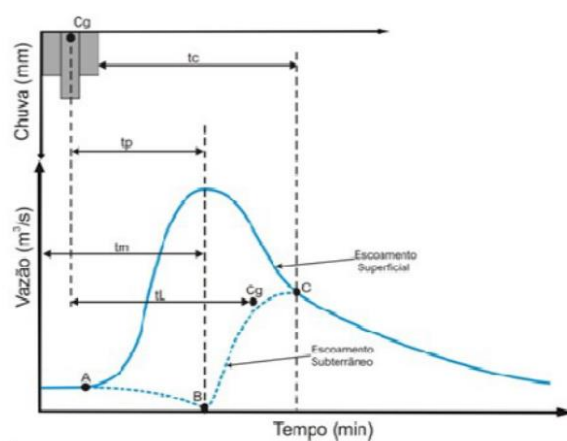
Fuente: Xu (2002).

2.3 Hidrogramas.

Un hidrograma es la representación gráfica de la variación del caudal de una sección de curso de agua a través del tiempo.(Palma, 2016). En otras palabras, un hidrograma es la equivalencia de gráficos de la descarga de flujo de un cuerpo de agua en función del tiempo que este transcurre. Esta distribución de caudal se da resultado de la interacción de todas las variables y componentes hidrológicas intervinientes en el ciclo hidrológico.(Palma, 2016).

El comportamiento de un hidrograma representando a una cuenca hidrográfica se muestra en la figura 8 a continuación.

Figura 8: Hidrograma del caudal en función del tiempo.



Fuente: FINOTTI et al., 2009 p.43 como se citó en Palma Trujillo, 2016.

Del cual TUCCI, caracteriza las componentes del hidrograma de la siguiente manera:

- Tiempo de retardo (t_l): Es definido como el intervalo de tiempo entre el centro de masa de la precipitación y el centro de gravedad del hidrograma.
- Tiempo de pico (t_p): Es definido como el intervalo de tiempo entre el centro de masa de la precipitación y el pico de caudal máximo.
- Tiempo de concentración (t_c): es el tiempo necesario para que el agua precipitada vaya del punto más distante de la cuenca hasta la sección evaluada. Este es el tiempo definido también como el tiempo entre el fin de la precipitación y el punto de inflexión del hidrograma.
- Tiempo de ascenso (t_m): es el tiempo entre el inicio de la lluvia y el pico del hidrograma.
- Tiempo de base (t_b): es el tiempo entre el inicio de la precipitación y el tiempo que el volumen precipitado ya escurrió a través de la sección evaluada, o en que el río vuelve a las condiciones anteriores de la precipitación;
- Tiempo de recesión (t_e): es el tiempo necesario para que el caudal baje hasta el punto C cuando acaba el escurrimiento superficial.

Caracterizaciones tomadas de (SILVEIRA, 1997 (TUCCI cap. 2), n.d.).

2.3.1 Hidrograma unitario.

El *hidrograma unitario*: es una curva que representa la forma en la que una cuenca devuelve un ingreso de lluvia distribuido en el tiempo. (Torres & Aragón, 2018).

Es un método utilizado en la hidrología para el cálculo del caudal de una cuenca hidrográfica que es producido por la precipitación. Su principio se basa en una relación

lineal de entrada-salida de la precipitación, es decir que alrededor del tiempo se produzcan precipitaciones idénticas con exactas condiciones, la precipitación producida que cae es tomada como una capa uniforme en la cuenca, por lo tanto, se esperaría que los hidrogramas serán los mismos. En definitiva se puede afirmar que el hidrograma unitario se define como la respuesta de la cuenca a un pulso de longitud unitaria que se produce durante un determinado tiempo.(Gonçalves et al., 2011).

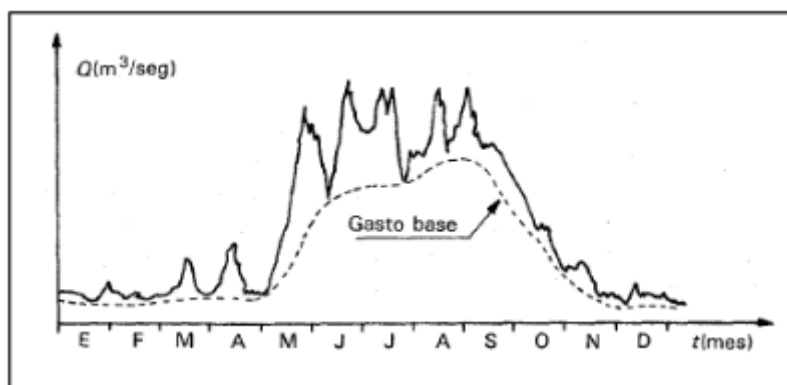
Las hipótesis básicas del método de *Hidrograma Unitario* según (Gonçalves et al., 2011) son:

- 1) Las alturas de los hidrogramas son proporcionales a las alturas de lluvia. Principio de proporcionalidad. Los hidrogramas son nomotéticos.
- 2) Se cumple el principio de superposición de causa efecto. Así dos pulsos ocurridos en diferentes momentos producen hidrogramas que suman sus ordenadas en los instantes correspondientes.
- 3) El tiempo base del hidrograma unitario se mantiene constante. (Gonçalves et al., 2011).

2.3.2 Hidrograma para diferentes duraciones de lluvia.

No es correcto asumir que un hidrograma típico es suficiente para describir una el comportamiento de la escorrentía en una cuenca ya que pueden existir variables de tormentas que llegan a producir cambios abruptos en su forma como la duración y la intensidad - tiempo. De otra forma, el hidrograma anual permite observar el balance obtenido de parámetros como la precipitación, evaporación y caudal o escorrentía de una cuenca hidrográfica en un año. (Chow et al., 1994). Como se puede observar en la siguiente gráfica:

Hidrograma anual.



Fuente: Aparicio (1992) tomado de (Iparraguirre & Bramont, 2015).

El estudio de los hidrogramas es importante ya que permite realizar una predicción de avenidas y fijan las descargas de diseño de un gran número de estructuras que cumplen la función de transportar el volumen de agua que generan los ríos. (Iparraguirre & Bramont, 2015).

2.3.3 Análisis de datos recopilados

Relleno de datos faltantes.

Monsalve (2008) menciona que: Los registros de datos meteorológicos pueden presentar series incompletas o datos faltantes debido generalmente a la negligencia del operador o ausencia del aparato medidor en el tiempo determinado, entre otros factores. El relleno de datos faltantes se realiza ya que en hidrología se trabaja con series continuas. (Monsalve, 2008).

El método de la recta de regresión permite ajustar una recta a una nube de dispersión, la recta que se forma se usa para completar la información faltante. Para el procedimiento se debe poseer dos tipos de serie, una serie índice y una serie a completar, de las cuales se define el coeficiente de correlación el cual define el grado de asociación lineal o dependencia entre dos variables. (Horna, 2016).

Para el coeficiente de correlación, entre las dos series analizadas debe poseer un valor mayor a 0.7, se calcula mediante la siguiente fórmula estadística:

$$R = \frac{\sum(X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{(n - 1)\sigma_X\sigma_Y}$$

Una vez que se ha comprobado que la correlación sea mayor a 0.7, se realiza el procedimiento de recta de regresión aplicando la siguiente ecuación correspondiente a una recta:

$$y = a + bx$$

Donde:

$$a = \bar{Y} - \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X^2}\bar{X}$$

$$b = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X^2}$$

X, Y son los datos de la serie índice y serie con datos faltantes respectivamente.

\bar{X}, \bar{Y} son la media de cada una de las series que representa.

σ_X, σ_Y son desviaciones estándar.

σ_{XY} es la Covarianza.

Análisis de consistencia de datos.

“El método de doble masas permite examinar y comprobar cuan homogeneidad existe en los datos de una estación meteorológica. La verificación que se realiza permite observar anomalías que se pueden presentar en algún periodo de la recopilación de datos”.(Monsalve, 2008).

El análisis de doble masa es una curva de valores acumulados de una estación en el eje de las ordenadas y, donde el valor de las abscisas representa los valores acumulados de una serie patrón. Del mismo modo Monsalve (2008) describe el método como la construcción de una curva doble acumulada, que permite relacionar todos los totales acumulados de información de precipitación de una zona con la media acumulada de los mismos totales del mismo periodo de tiempo y región, considerando una distribución homogénea desde el punto de vista de datos.(Monsalve, 2008).

Andrade (2020) se refiere al resultado de la consistencia de datos como una curva resultante representada por una recta, con una pendiente que prueba la regularidad del registro de la estación. (Andrade, 2020).

2.4 Software Rs Minerve y su aplicación en la hidrología.

2.4.1 Generalidades y alcances.

“RS MINERVE se basa en el mismo concepto de Routing System II, software anterior desarrollado en el Laboratorio de Hidráulica Construcciones (LCH) en la Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) (Dubois et al, 2000; García Hernández et al, 2007) y se utiliza desde 2002 en diferentes proyectos y tesis, como por Jordan (2007) o Claude (2011). El software que se describen más adelante, RS MINERVE, actualmente es desarrollado por la CREALP y HydroCosmos SA, con la colaboración de la LCH se ha mencionado anteriormente, así como la Universidad Politécnica de Valencia (UPV). También se ha utilizado desde 2011 en numerosos proyectos y tesis (por ejemplo, García Hernández, 2011).”(Foehn et al., 2019)

RS Minerve es un software creado y enfocado principalmente en la simulación y modelación de redes hidrográficas con un concepto semi-distribuido, el cual divide la cuenca en estudio en diferentes sub-cuencas. El programa incluye procesos hidrológicos como: deshielo de glaciares, flujo superficial y subterráneo y elementos de control hidráulico como son compuertas, vertederos, desvíos, turbinas y bombas. (Foehn et al., 2019).

El software RS Minerve se distribuye gratuitamente, varios proyectos y tesis han usado y continúan usando este programa para estudiar cuencas en Suiza, España, Perú, Brasil Francia y Nepal. Además del centro de investigación CREALP y la oficina de ingeniería. HydroCosmos SA, que actualmente desarrolla RS Minerve, dos universidades (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne y Universitat Politècnica de València) colaboran para mejorar RS Minerve y usarlo para apoyar cursos de posgrado en Ingeniería Civil y Ciencias Ambientales. (Foehn et al., 2019).

Una de las facultades más notables de RS Minerve es la versatilidad que posee. Por ejemplo, el software tiene un estilo y diseño que es amigable y didáctico para el usuario, la importación de datos al programa es de manera sencilla y de la misma forma sucede con la exportación de la información obtenida.

Respecto a la modelación de cuencas hidrográficas, RS Minerve puede construir modelos hidrológicos semi-distribuidos con ayuda de su herramienta GIS que permite utilizar capas vectoriales de subcuencas, el modelo que se concibe es capaz de adaptarse al lugar

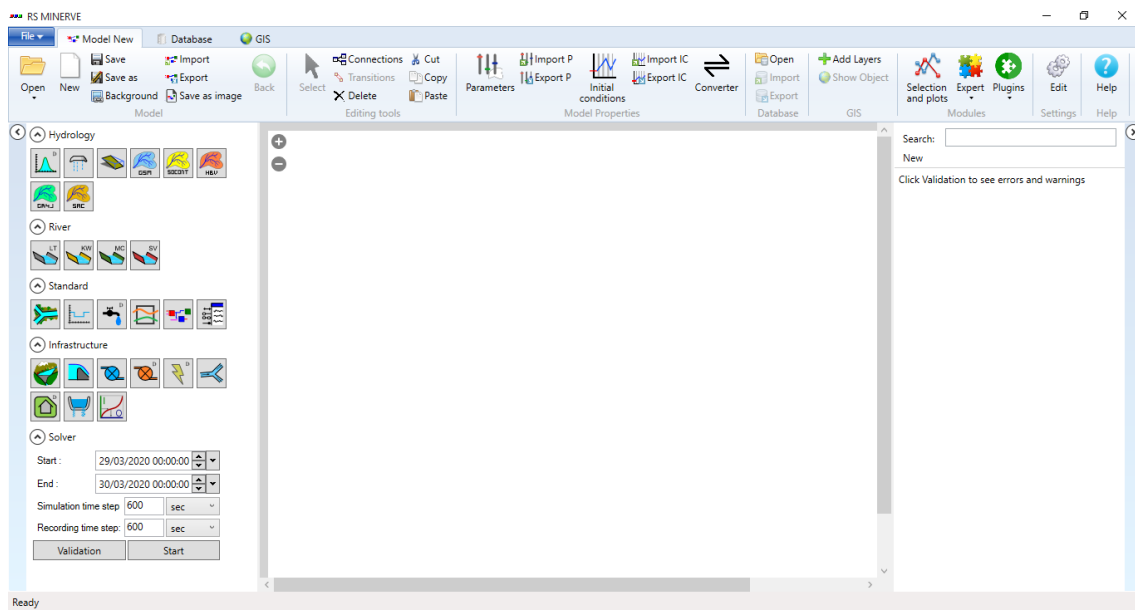
o zona de estudio y al número de datos disponibles, porque posee diferentes modelos hidrológicos para el cálculo de la escorrentía, mismos que van a ser analizados posteriormente. (WaterPi, 2018).

La adaptabilidad que se ha encontrado en RS Minerve se basa también en las abundantes aplicaciones que ha tenido a nivel mundial. El desarrollo del programa en Suiza a cargo del centro de investigación del medio alpino. (CREALP, 2020).

2.4.2 Fundamentos físicos e interfaz de RS Minerve.

RS Minerve tiene la capacidad de simular modelos hidrológicos complejos, cabe destacar también las funcionalidades y herramientas hidráulicas que el software posee. El área de trabajo de RS Minerve se muestra en la figura 9.

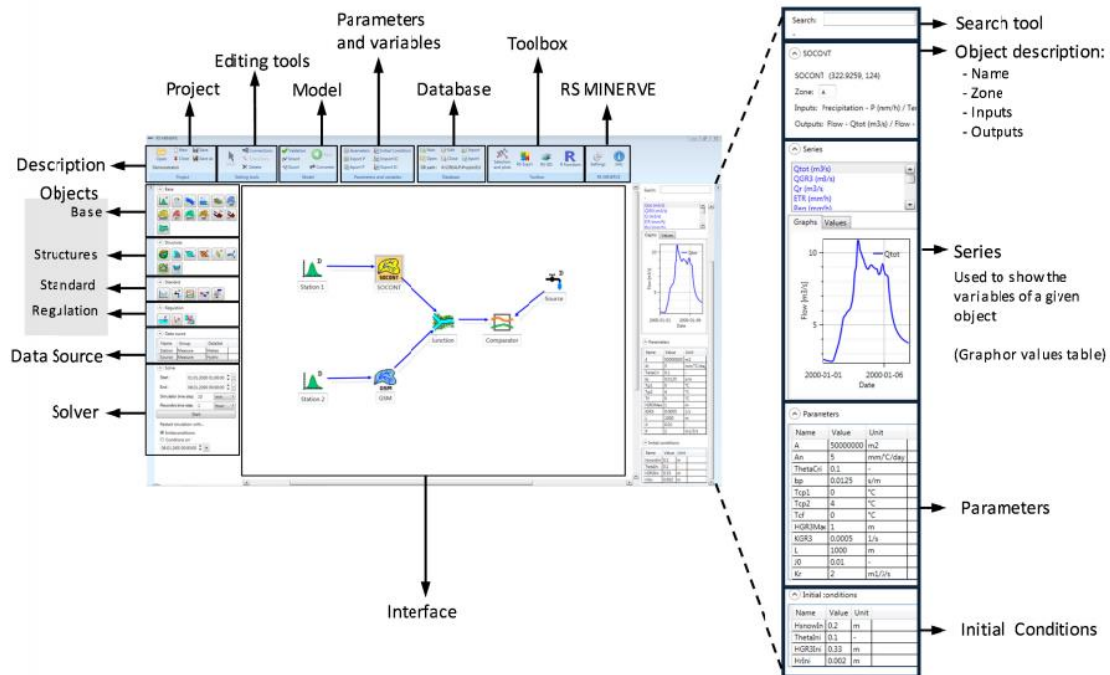
Figura 9: Captura de pantalla del área de trabajo de RS Minerve.



Fuente: RS Minerve.

El interfaz de RS Minerve no es muy distinto al que presentan la mayoría de los programas que se suele usar en la cotidianidad. El manual de uso de RS Minerve divide el interfaz como se muestra en la figura número 10.

Figura 10: Interfaz del área de trabajo de RS Minerve.



Fuente: Manual de usuario de RS Minerve.

Como se ha mostrado el software RS Minerve permite la modelación tanto hidrológica como hidráulica a través de los objetos que representan variables y/o parámetros pertenecientes a una cuenca hidrográfica, los objetos son los siguientes:

Lista de objetos de RS Minerve:

- Hidrología:
 - Virtual station (Estación virtual).
 - modelo Snow-SD.
 - Runoff model (Modelo SWMM).
 - Modelo GSM.
 - Modelo SOCONT.
 - Modelo HBV.
 - Modelo GR4J.
 - Modelo SAC.
- Ríos: descripción de enrutamiento de canales.
 - St. Venant routing.
 - Muskingum-Cunge routing.
 - Kinematic Wave routing.
 - Lag-time.

- Standar (Estándar):
 - Junction (Unión).
 - Time Series. (Series de tiempos).
 - Source (fuente).
 - Comparator (comparador).
 - Sub-model.
 - Group Interface (interfaz de grupo).
- Estructuras: Modelos Hidráulicos
 - Reservorio.
 - Nivel-Descarga HQ.
 - Turbina.
 - Turbina DB.
 - Hydropower (centrales hidroeléctricas).
 - Desviación.
 - Consumidor.
 - Eficiencia de estructura.
- Objetos de regulación.
 - Planner (planificador).

Lista de objetos obtenida en (Foehn et al., 2019).

2.4.3 Descripción de modelos hidrológicos de RS Minerve.

La ventana principal o interfaz de RS Minerve se estructura por diferentes marcos que la componen, entre los principales que se componen los denominaremos objetos de modelo hidrológicos. Los objetos principalmente abarcan la base de variables hidro-meteorológicas.

Virtual weather station ó V- Station

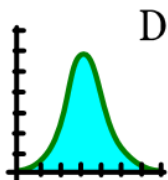


Figura 11: Objeto V-Station.

D Este icono representa a una estación virtual capaz de calcular condiciones meteorológicas locales de precipitación, temperatura, evapotranspiración potencial en función de la base de datos incorporada de datos observados o pronosticado. Esta estación virtual posee la ventaja de realizar en base a métodos de interpolaciones de Thiessen o Shepard. Además, el ETP también se puede calcular con

un valor constante o con una de las diferentes ecuaciones propuestas por Turc (1955, 1961), McGuinness et Bordne (1972) u Oudin (2004). (Foehn et al., 2019).

Este objeto se relaciona a base de distribución espacial de las variables meteorológicas (precipitación, temperatura y evapotranspiración) razón por la cual los parámetros de ingreso son las coordenadas x, y, z en referencia espacial en coordenadas métricas a más de los parámetros mostrados en la tabla 1.

El método elegido para la distribución espacial de la precipitación, la temperatura y el ETP corresponde a los métodos de Thiessen y Shepard. El primer método, Thiessen, busca la estación meteorológica más cercana para cada variable meteorológica. La segunda, Shepard, busca i estaciones que se encuentran en un radio de búsqueda y calcula la variable meteorológica en función de la ponderación de distancia inversa.(García Hernández et al., 2020).

Tabla 1: Parámetros del objeto V-Station.

Nombre	Descripción	Unidades	Rango regular
X	Coordenada X	m	
Y	Coordenada Y	m	
Z	Coordenada Z	m	
Search Radius	Radio de búsqueda	m	> 0
No. Min. Of stations	Mínimo de estaciones para interpolaciones		≥ 1
Gradient P	Gradiente de precipitación	1/m	
Gradient T	Gradiente de temperatura	°c/m	-0.007 a 0.004
Gradient ETP	Gradiente de evapotranspiración	1/m	
Coeff P	Coefficiente de precipitación		0.5 a 2
Coeff T	Coefficiente de temperatura		2 a 2
Coeff ETP	Coefficiente de evapotranspiración		0.5 a 2

Fuente: (García Hernández et al., 2020)

Modelo hidrológico SNOW-SD.



Figura 12: Objeto SNOW-SD.

el modelo SNOW-SD representa a un modelo de nieve que posee un factor de grado día-estacional, este modelo hidrológico está compuesto de dos submodelos que permiten la simulación transitoria de la capa de nieve en la acumulación y fusión de la misma. En función de la temperatura y precipitación se produce una precipitación equivalente, que son variables de entrada o inputs para modelos con aporte de nieve como lo son los modelos GSM, SOCONT y HBV, a su vez son una variable de entrada para el modelo SAC-SMA o GR4J.(Foehn et al., 2019).

Tabla 2: Parámetros del Modelo Snow-SD.

Nombre	Descripción	Unidades
S	Referencia grado-día de coeficiente de deshielo	mm/°c/d
S Int	Grado de intervalo de deshielo de día	mm/°c/d
S Min	Grado de coeficiente min de deshielo de nieve por día	mm/°c/d
S Ph	Desplazamiento de fase de la función sinusoidal (días)	d
ThetaCri	Contenido crítico relativo de agua de la capa de nieve	
bp	Coeficiente de fusión debido a la precipitación líquida	d/mm
Tcp1	Temperatura crítica mínima para precipitación líquida	°C
Tcp2	Temperatura crítica máxima para precipitación sólida	°C
Tcf	Temperatura crítica de deshielo	°C
CFR	Coeficiente de congelación	
Condiciones Iniciales		
SWEIni	Altura inicial equivalente de agua de nieve	m
ThetaIni	Contenido de agua relativo inicial en la capa de nieve	

Fuente: (García Hernández et al., 2020).

Modelo SMWW.

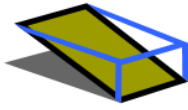


Figura 13: Objeto SMWW.

El modelo hidrológico SMWW significa Storm Water Management Model” (Modelo de gestión de aguas pluviales). El modelo SWMM fue desarrollado por Metcalf y Eddy (1971). En base a la precipitación a partir de la lluvia neta se calcula el caudal de escorrentía, y su información está representada por un hidrograma. Este modelo hidráulico se utiliza generalmente cuando una cuenca hidrográfica se considera impermeable. (Foehn et al., 2019).

Tabla 3: Parámetros del objeto SMWW.

Nombre	Descripción	Unidades
A	Superficie de escorrentía	m ²
L	Longitud del plano	m
Jo	Pendiente de escorrentía	-
K	Coficiente Strickler	m ^{1/3} /s
Condiciones Iniciales		
H Ini	Nivel de agua inicial aguas abajo de la superficie	m

Fuente: (García Hernández et al., 2020).

El parámetro que se debe ajustar en este modelo es el K (coeficiente Strickler), ya que se supone que los parámetros restantes (Jo, L, A) son constantes.(García Hernández et al., 2020).

Modelo hidrológico GSM.



Figura 14: Objeto GSM.

El modelo u objeto GSM de las siglas Glacial Snow Melt (Derretimiento de nieve glacial) representa una combinación de modelos que poseen un aporte de nieve y glaciales, con este objeto hidrológico se calcula el caudal total, caudal de nieve y caudal glaciario a partir de base de datos de precipitación y temperatura.(Foehn et al., 2019).

Tabla 4: Parámetros del modelo GSM.

Nombre	Descripción	Unidades
A	Superficie de infiltración	m ²
S	Referencia grado-día de coeficiente de deshielo	mm/°c/d
S Int	Grado de intervalo de deshielo de día	mm/°c/d
S Min	Grado de coeficiente min de deshielo de nieve por día	mm/°c/d
Sph	Desplazamiento de fase de la función sinusoidal (días)	d
ThetaCri	Contenido crítico relativo de agua de la capa de nieve	-
bp	Coficiente de fusión debido a la precipitación líquida	d/mm
Tcp1	Temperatura crítica mínima para precipitación líquida	°C
Tcp2	Temperatura crítica máxima para precipitación sólida	°C
Tcf	Temperatura crítica de deshielo	°C
G	Referencia grado-día coeficiente de fusión del glaciar	mm/°c/d
G Int	Intervalo de derretimiento de glaciares por día grado	mm/°c/d
G Min	Coficiente mínimo de fusión de glaciares por día	mm/°c/d
Tcg	Temperatura crítica de fusión del glaciar	°C
Kgl	Coficiente de liberación del depósito de fusión del glaciar	1/d
Ksn	Coficiente de liberación del depósito de deshielo	1/d
CFR	Coficiente de congelación	-
Condiciones Iniciales		
SWEIni	Altura inicial equivalente de agua de nieve	m
ThetaIni	Contenido de agua relativo inicial en la capa de nieve	-
QsnowIni	Salida inicial del depósito de nieve lineal	m ³ /s
QglacierIni	Salida inicial del depósito glaciar lineal	m ³ /s

Fuente: (García Hernández, et al., 2020).

Modelo hidrológico SOCONT.



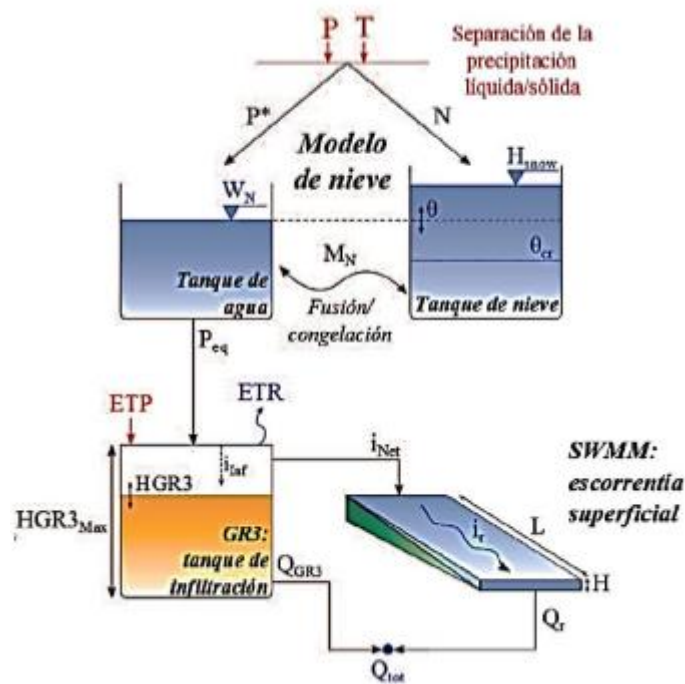
Figura 16: Objeto Socont.

SOCONT significa SOil CONTtribution, la representación de este modelo hidrológico posee un aporte de nieve y es la combinación de los modelos Snow, Infiltration o GR3 y SWMM. Las variables de entrada para la modelación son la precipitación, temperatura y la

evapotranspiración (ETP) que calculan los caudales totales, de infiltración, escorrentía y la ETR o evapotranspiración real. (Foehn et al., 2019).

El modelo SOCONT fue desarrollado por Consuegra & Vez (1996). El modelo GSM simula una capa de nieve transitoria como una función de la temperatura y precipitación originando una precipitación equivalente que sirve de entrada al modelo GR3, el cual usa la precipitación equivalente y la evapotranspiración potencial para generar una descarga de infiltración y una intensidad neta que será usada en el modelo SWMM para generar escorrentía superficial, siendo el caudal total la suma de la escorrentía y el caudal de infiltración como representa la figura 17. (Aliaga, 2017).

Figura 17: Modelo SOCONT.



Fuente: (Aliaga, 2017)

Los parámetros que definen al modelo se muestra en la tabla 5.

Tabla 5: Parámetros del Modelo SOCONT.

Nombre	Descripción	Unidades
A	Superficie de infiltración	m ²
S	Referencia grado-día de coeficiente de deshielo	mm/°c/d
S Int	Grado de intervalo de deshielo de día	mm/°c/d
S Min	Grado de coeficiente min de deshielo de nieve por día	mm/°c/d
Sph	Desplazamiento de fase de la función sinusoidal (días)	d
ThetaCri	Contenido crítico relativo de agua de la capa de nieve	-
Tcp1	Temperatura crítica mínima para precipitación líquida	°C
Tcp2	Temperatura crítica máxima para precipitación sólida	°C
Tcf	Temperatura crítica de deshielo	°C
bp	Coeficiente de fusión debido a la precipitación líquida	d/mm
HGR3 Max	Altura máxima del reservorio de infiltración	mm
KGR3	Coeficiente de liberación del reservorio de infiltración	1/s
L	Longitud del plano	m
Jo	Pendiente de escorrentía	-
Kr	Coeficiente Strickler	m ^{1/3} /s
Condiciones Iniciales		
SWEIni	Altura inicial equivalente de agua de nieve	m
ThetaIni	Contenido de agua relativo inicial en la capa de nieve	-
HGR3Ini	nivel inicial en el depósito de infiltración	m
HrIni	nivel inicial de agua de escorrentía aguas abajo de la superficie	m

Fuente: (García Hernández et al., 2020).

Modelo hidrológico HBV.



Figura 18: Objeto HBV.

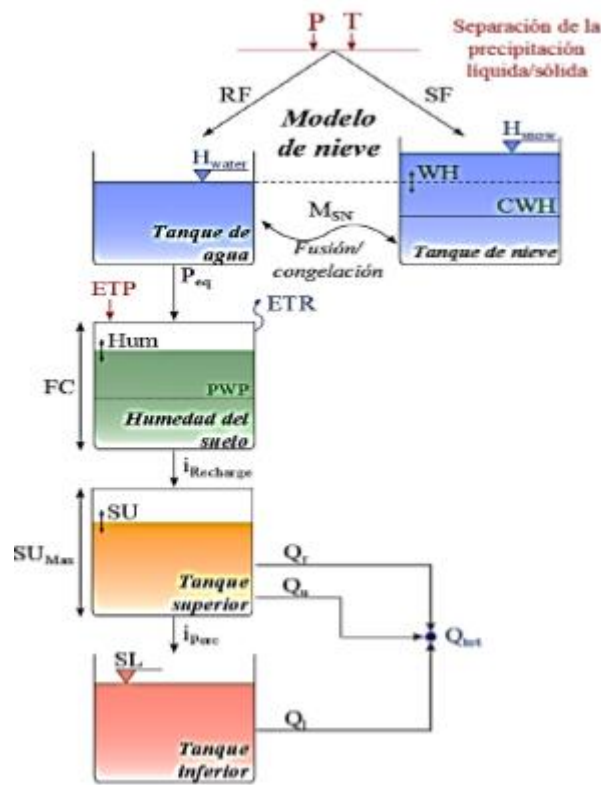
El significado es “Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning”.

Este modelo integrado de lluvia y escorrentía se basa en el modelo HBV.

Usando una precipitación (P), una temperatura (T) y una evapotranspiración potencial (ETP) como entradas, produce una descarga total (Q_{tot}) compuesta de un flujo de escorrentía (Q_r), un flujo interno (Q_u) y un flujo base (Q_l). (Foehn et al., 2019).

El modelo HBV es un modelo hidrológico determinístico y conceptual, desarrollado por StenBergstrom (1992) en Suecia con la ayuda del instituto meteorológico e hidráulico. Genera un modelo que estima la escorrentía de una cuenca produciendo un modelo que describe el balance de agua de la cuenca en tres depósitos de almacenamiento, el primer depósito representa la zona humedad del suelo, el segundo representa una zona de flujo de tormenta sub-superficial y el tercer depósito representa a una zona de almacenamiento inferior.(Aliaga, 2017).

Figura 19: Modelo HBV.



Fuente: (Aliaga, 2017).

Los parámetros y condiciones iniciales en los que se sustenta este modelo se encuentran a continuación en la tabla Nro. 6.

Tabla 6: Parámetros del Modelo HBV.

Nombre	Descripción	Unidades
A	Superficie de infiltración	m ²
CFMax	Factor de fusión	mm/°C/d
CFR	Coefficiente de congelación	
CWH	Contenido crítico relativo de agua de la capa de nieve	
TT	Umbral de temperatura de lluvia / nieve	°C
TTInt	Intervalo de temperatura para mezclar lluvia / nieve	°C
TTSM	Temperatura umbral para derretimiento de nieve	°C
Beta	Parámetro modelo (coeficiente de forma)	
FC	Máxima capacidad de almacenamiento del suelo.	m
PWP	Umbral de punto de marchitez permanente del suelo	
SUMax	Umbral de nivel de agua del depósito superior	m
Kr	Coefficiente de almacenamiento de flujo cerca de la superficie	1/d
Ku	Coefficiente de almacenamiento entre flujos	1/d
Kl	Coefficiente de almacenamiento de flujo base	1/d
Kperc	Coefficiente de almacenamiento de percolación	1/d
Condiciones Iniciales		
SWEIni	Altura inicial equivalente de agua de nieve	m
WHIni	Contenido de agua relativo inicial en la capa de nieve	
HumIni	Humedad inicial	m
SUIni	Nivel inicial de agua del depósito superior	m
SLIni	Nivel inicial de agua del depósito inferior	m

Fuente: (García Hernández et al., 2020).

Modelo hidrológico GR4J.



Figura 20: Objeto GR4J.

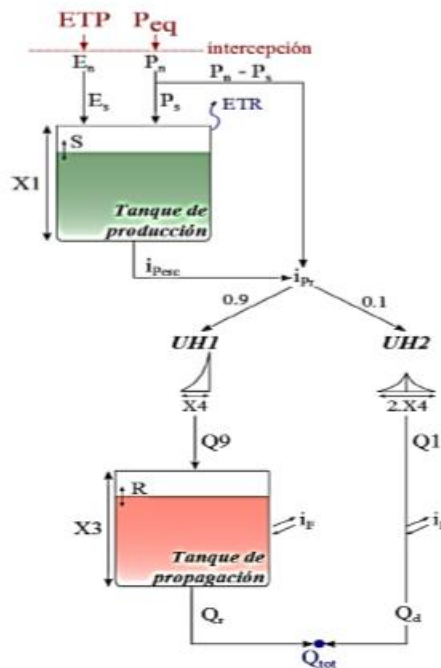
El modelo GR4J (“Génie Rural à 4 paramètres Journalier”), es un objeto el cual contiene 4 parámetros y mediante los datos de precipitación y ETP es capaz de calcular los siguientes flujos de salida como son: el caudal total, caudal de escorrentía caudal de base y ETR. La

precipitación que se usa para este modelo hidrográfico puede ser la precipitación equivalente.(Foehn et al., 2019).

Este modelo fue desarrollado por Perrin et al. (2003) entre sus principales características es que destaca por ser un modelo hidrológico global con cuatro parámetros de entrada, además de ser un modelo empírico con una estructura similar a un modelo conceptual. Este modelo es una versión modificada del modelo GR3J propuesto por Edijatno & Michel en 1989. (Aliaga, 2017).

El modelo describe dos reservorios (véase la figura 21 y tabla 7), en donde se almacena la precipitación neta y a la vez se producen los fenómenos de percolación e infiltración. Se toma en cuenta la humedad, pero no los procesos de precipitación sólida. El depósito de producción representado por X1 almacena las precipitaciones en la superficie del suelo. El coeficiente de intercambio de aguas subterráneas X2 representa una función de las aguas subterráneas y si este parámetro tiene un valor negativo, entonces el agua ingrese al acuífero, cuando tiene un valor positivo, el agua sale del acuífero. El parámetro X3 es la capacidad del depósito de laminación que es la cantidad de agua que se almacena en los poros del suelo y depende de su humedad contenida. Y X4 es el tiempo base de los hidrogramas unitarios tomando el punto más alto de las ordenadas en el hidrograma de crecidas. (Aliaga, 2017).

Figura 21: Modelo GR4J.



Fuente: (Aliaga, 2017).

La tabla 7 muestra los parámetros que son entrada para la ejecución del modelo GR4J.

Tabla 7: Parámetros del Modelo GR4J.

Nombre	Descripción	Unidades
A	Superficie de infiltración	m ²
X1	Capacidad de almacenamiento de producción	mm
X2	Capacidad de intercambio de agua	mm
X3	Capacidad de depósito de agua	mm
X4	Tiempo base del hidrograma unitario	d
Condiciones Iniciales		
SIni	Contenido inicial de agua en el depósito de producción.	m
RIni	Nivel de agua inicial en el depósito de enrutamiento	m

Fuente: (García Hernández et al., 2020).

La tabla 8 muestra los rangos de los valores que pueden adoptar cada uno de los parámetros.

Tabla 8: Valores de parámetros del modelo GR4J.

Unidad	Descripción	Rango	Valor por defecto
m ²	Área de la cuenca		
m	Capacidad del depósito de producción (X1)	[0.01,1.2]	0.05
m	Coeficiente de intercambio de agua (X2)	[-0.005, 0.003]	0
m	Capacidad del depósito de enrutamiento (X3)	[0.01,0.5]	0.05
d	Tiempo base de los hidrogramas unitarios (UH) (X4)	[1.1,2.9]	1.7

Fuente: adaptado de (García Hernández et al., 2020).

El modelo hidrológico GR4J emplea las siguientes ecuaciones para la obtención de caudales. El primer cálculo es la neutralización de Peq (equivalente de precipitación) por ETP para determinar una intensidad neta (Pn) y una evapotranspiración neta (En) como se muestra en la ecuación. (García Hernández et al., 2020).

$$Pn = Peq - ETP \quad \text{si } P \geq ETP$$

$$En = 0$$

$$Pn = 0 \quad \text{si } P < ETP$$

$$En = ETP - Peq$$

Y las demás ecuaciones que emplea el modelo GR4J se presentan a continuación:

$$Ps = \frac{d}{dt} \frac{X_1 * \left(1 - \left(\frac{S}{X_1}\right)^2\right) * \tanh\left(\frac{Pn * dt}{X_1}\right)}{1 + \left(\frac{S}{X_1}\right) * \tanh\left(\frac{Pn * dt}{X_1}\right)}$$

$$Es = \frac{d}{dt} \frac{S * \left(2 - \left(\frac{S}{X_1}\right)^2\right) * \tanh\left(\frac{En * dt}{X_1}\right)}{1 + \left(1 - \frac{S}{X_1}\right) * \tanh\left(\frac{En * dt}{X_1}\right)}$$

$$iPerc = \frac{d}{dt} (S + (Ps - Es) * dt) * \left(1 - \left(1 + \left(\frac{4}{9} * \frac{(S + (Ps - Es) * dt)}{X_1}\right)^4\right)^{\frac{1}{4}}\right)$$

$$iPr = iPerc + (Pn - Ps)$$

$$Q_9 = 0.9 * \sum_{j=1}^l (UH1_j * iPr_{k-j-l})$$

$$Q_9 = 0.1 * \sum_{j=1}^m (UH2_j * iPr_{k-j-l})$$

$$iF = \frac{d}{dt} X_2 \left(\frac{R}{X_3} \right)^{7/2}$$

$$Qr' = \frac{d}{dt} (R + (Q_9 + iF) * dt) * \left(1 - \left(1 + \left(\frac{R + (Q_9 + iF) * dt}{X_3} \right)^4 \right)^{\frac{1}{4}} \right)$$

$$Qd' = Q1 + iF$$

$$Qtot = (Qr' + Qd')A$$

Donde:

Ps: precipitación que ingresa al depósito de producción (m/d).

S: Contenido de agua en el depósito de producción (m).

Pn: Precipitación neta (m/d).

Es: Evapotranspiración del depósito de producción (m/d).

En: Evapotranspiración neta (m/d).

iPerc: Intensidad de percolación (m/d).

iPr: Intensidad que fluye al depósito de enrutamiento (m/d).

Q9: Caudal unitario del UH1 (m/d).

Q1: Caudal unitario de UH2 (m/d).

R: Contenido de agua en el depósito de enrutamiento (m).

iF: Función de intercambio (m/d).

Qr': Caudal unitario de salida del depósito de enrutamiento (m/d).

Qd': Caudal unitario de salida complementario (m/d).

A: Superficie de la cuenca (m²).

Qtot: Caudal total de salida (m³/d).

Formulario adaptado de (García Hernández et al., 2020).

Modelo hidrológico SAC-SMA.



Figura 22: Objeto SAC-SMA.

El modelo SAC-SMA (SACramento Soil Moisture Accounting”). El objeto SAC-SMA (Sacramento-Soil Moisture Account) utiliza una precipitación equivalente (P_{eq}) y una evapotranspiración potencial (ETP) como entradas y proporciona un flujo de salida en la salida de la subcuenca.(Foehn et al., 2019). Los cálculos de salida son los flujos de caudal total, caudal de escorrentía, caudal base, caudal de percolación profunda y ETR. (Foehn et al., 2019).

Los modelos hidrológicos implementadas (Snow-SD, SWMM y GSM-SOCONT) se han desarrollado en el marco de diferentes proyectos de investigación, a saber, CRUEX (BEROD, 1994), SWURVE (Schaepli & al., 2005) y MINERVE 1 (Hamdi & al., 2003, 2005). Los modelos hidrológicos de HBV (Bergström 1976, 1992), GR4J (Perrin et al., 2003) y el saco (Burnash, 1995) También Los modelos hidrológicos de HBV (Bergström 1976, 1992), GR4J (Perrin et al., 2003) y el saco (Burnash, 1995) También están incluidos en el software RS Minerve para extender las posibilidades de modelado hidrológico.(Foehn et al., 2019).

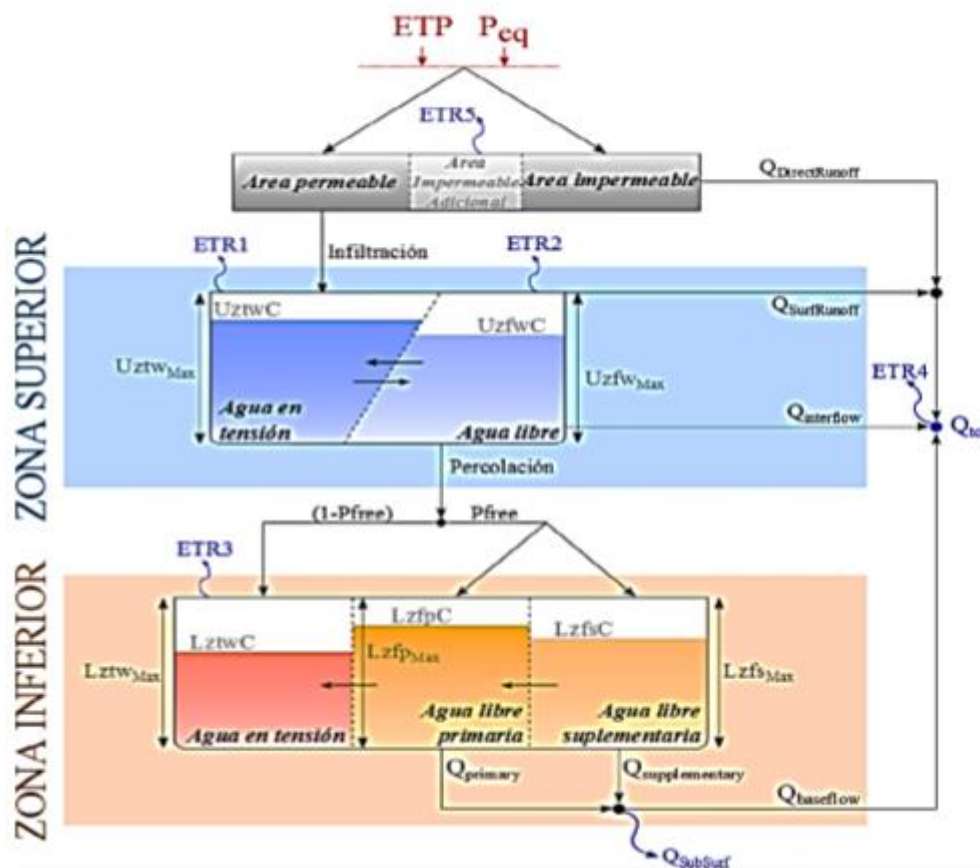
El presente modelo hidrológico ha sido desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos División Norte conjuntamente el personal del Centro de Predicción Fluvial del Servicio de Meteorológico Nacional de Estados Unidos y el Departamento de Recursos Hídricos, en Sacramento, California en la década de los 70.(Aliaga, 2017).

La característica que del modelo hidrológico SAC (Sacramento Soil Moisture Accounting) es de ser un modelo determinístico conceptual, el cual requiere información de precipitación y evapotranspiración media diaria para generar descargas del mismo paso de tiempo. Para este modelo las variables y condiciones del suelo son importantes ya que representa las características que posee el suelo en cuanto a la manera en que se distribuye la humedad, así como también los estados de energía del suelo y brinda una manera físicamente realista de las distintas zonas. El modelo es ideal para cuencas mayores a 1000 km². Para este modelo se requiere un gran número de parámetros, esto implica un conocimiento profundo de la cuenca en estudio que se vaya a simular, teniendo en cuenta información como la cobertura vegetal o zonas permeables o impermeables. La

estructuración de este modelo está basada en tres reservorios complejos que se encuentran influenciados por la evapotranspiración (ETP). El primer reservorio (color plomo) representa la división de sectores permeables e impermeables que producen escorrentía superficial cuando la lluvia supera la tasa de infiltración del suelo, el siguiente reservorio (color celeste) representa la capa superior del suelo donde se origina el interflujo, y el tercer reservorio representa la zona inferior que está vinculada a los procesos de descarga con respuesta lenta, estos tres reservorios dan origen al caudal total simulado o de salida del modelo.(Aliaga, 2017).

La representación gráfica del modelo SAC-SMA se puede visualizar en la figura 23.

Figura 23: Modelo SAC-SMA



Fuente: (Aliaga, 2017).

En la tabla 9 se encuentran los parámetros y condiciones iniciales del modelo SAC-SMA.

Tabla 9: Parámetros del Modelo SAC-SMA.

Nombre	Descripción	Unidades
A	Superficie de infiltración	m ²
Adimp	Fracción máxima de un área impermeable adicional debido a la saturación	-
Pctim	Fracción de área impermeable permanente	-
Riva	Fracción del área vegetaria ribereña	-
UztwMax	Tensión de la zona superior Capacidad de agua	m
UzfwMax	Capacidad de agua libre en la zona superior	m
Uzk	Tasa de agotamiento entre flujos del almacenamiento de agua libre de la zona superior	1/d
Zperc	Relación de tasas de filtración máximas y mínimas	-
Rexp	Parámetro de forma de la curva de percolación	-
Pfree	Fracción de filtración que va directamente a los depósitos de agua libre de la zona inferior	-
LztwMax	La capacidad de agua de la tensión de la zona inferior	m
LzfpMax	La capacidad de agua libre primaria de la zona inferior	m
LzfsMax	La capacidad de agua libre suplementaria de la zona inferior	m
Rserv	Fracción del agua libre de la zona inferior no transferible al agua de tensión de la zona inferior	-
Lzpk	Tasa de agotamiento del almacenamiento de agua libre primaria de la zona inferior	1/d
Lzsk	Tasa de agotamiento del almacenamiento de agua libre suplementario de la zona inferior	1/d
Side	Relación de percolación profunda de los depósitos de agua libre de la zona baja	-
Condiciones Iniciales		
AdimIni	Contenido de agua de tensión inicial del área de Adimp	m
UztwIni	Tensión inicial de la zona superior Contenido de agua	m
UzfwIni	Contenido de agua libre inicial de la zona superior	m
LztwIni	Contenido de agua de la tensión inicial de la zona inferior	m
LzfpIni	Zona Inicial Inicial Contenido complementario gratuito	m
LzfsIni	Contenido primario inicial de la zona inferior libre	m

Fuente: (García Hernández et al., 2020).

2.4.4 Ríos y/o canales en RS Minerve.

Se define a un río como un sistema dinámico de flujo de agua y sedimentos que controlan la función biológica de la tierra. Son los corredores activos más importantes que tiene la naturaleza y dependen de estos para el equilibrio de la vida.(Gonçalves et al., 2011).

Los ríos en RS Minerve se los define como objetos, estos objetos de flujo que representan ríos son propuestos por el software, de los cuales a partir de un hidrograma aguas arriba se calcula un hidrograma aguas abajo.(Foehn et al., 2019).

Los parámetros y condiciones de los ríos se encuentran agrupados en la tabla 10.

Tabla 10: Parámetros de los ríos en RS Minerve.

Nombre	Descripción	Unidades
L	Longitud	m
B0	Ancho de la base del canal	m
m	Coefficiente de relación de banco lateral (1H / mV)	-
J0	Pendiente	-
K	Coefficiente Strickler	m ^{1/3} /s
N	Número de secciones (no para tiempo de retraso)	-
Lag	Tiempo de retraso (solo para tiempo de retraso)	Min
Condiciones Iniciales		
QIni	Descarga inicial	m ³ /s

Fuente: (García Hernández et al., 2020).

Su objetivo es la modelación del tránsito de venidas. Entre los objetos río o canal se encuentran los siguientes:

- Lag-time (LT).
- Kinematic wave.
- Muskingum-Cunge.
- St-Venant.

2.5 Simulación hidrológica.

La simulación hidrológica es una técnica que permite reproducir una serie de eventos a través de expresiones matemáticas que representan varias situaciones del mundo físico. Se basa a partir de condiciones iniciales que progresan en el tiempo repitiendo relaciones funcionales entre los diferentes elementos del sistema. Generalmente las simulaciones se realizan por computador. (Sánchez, 1974).

2.5.1 Modelos hidrológicos de simulación: Generalidades.

La simulación se define como “el desarrollo y aplicación de modelos matemáticos para representar la variación temporal de la interacción de los procesos físicos” y que la simulación numérica ofrece un importante aporte a la solución de problemas hidrológicos.(Sanchez, 1974).

González (1989) menciona que “para hacer una representación de un sistema (ciclo hidrológico) que permita simular su comportamiento, el hidrólogo se vale de modelos específicos, los cuales, dada su concepción, van a ser clasificados como determinísticos o estocásticos. (González M., 1989).

Para la aplicación de un modelo hidrológico de simulación a una cuenca hidrográfica se realiza a través de un procedimiento de verificación que establece los valores de ciertos parámetros para un sistema en particular. La verificación de un modelo se realiza en dos etapas: la calibración y la validación. La primera etapa fija los valores de los parámetros o condiciones iniciales y la segunda es la prueba del modelo de simulación. (Sanchez, 1974).

2.5.2 Verificación de modelos hidrológicos de simulación.

Calibración.

La calibración se define como una operación, la cual consiste en la determinación de los valores de los parámetros de una modelación hidrológica, esta acción permite minimizar errores y optimizar la modelación.

La complejidad de una calibración de un modelo hidrológico depende de la del número total de parámetros que se disponga a calibrar, la búsqueda de los valores más óptimos se puede realizar manualmente cuando es un número bajo de parámetros, sin embargo cuando la cuenca de estudio es grande e incluye una gran cantidad de parámetros, la calibración manual no es una opción rápida ni oprimada, por lo que RS Minerve cuenta con

una herramienta de calibración automática que se encuentra en el menú “Expert” en la herramienta “Calibrator”. (Iparraguirre & Bramont, 2015).

Función Objetivo y coeficientes de Calibración.

Los modelos constan de fórmulas matemáticas que poseen constantes para representar los procesos físicos. Las constantes, conocidas como parámetros, deben ser estimadas de manera que el modelo puede asemejarse de la mejor forma a la realidad (Xu, 2002; Linsley et al, 1977).

La función objetivo es una función que está constituida por uno o varios indicadores de eficiencia, que permiten y ayudan a comparar el error de las series de caudales simulados y los observados, definiendo de esta forma un juego de parámetros que sea óptimo para la modelación hidrológica en estudio.

En relación a la función objetivo, Cabrera (2009) la define como una medida de bondad de ajuste que son indicadores estadísticos de eficiencia como son los coeficientes de Nash-Sutcliffe, Coeficiente de Nash-In, RRMSE y RVB, entre otros. Los coeficientes se usan para evaluar el comportamiento de las series simuladas en los modelos hidrológicos que se han propuesto en el estudio.(Cabrera, 2009).

Los principales indicadores o coeficientes estadísticos de eficiencia de calibración que se emplea son los siguientes:

Coeficiente de Nash-Sutcliffe.

El coeficiente de Nash- Sutcliffe es el indicador estadístico de eficiencia más empleado y con un uso muy extendido para la evaluación de la predicción de series simuladas en modelos hidrológicos. El rango del coeficiente de Nash- Sutcliffe es de $e^{-\infty}$ a 1 siendo 1 el valor optimo, sin embargo, se tiene los siguientes valores aceptables para este coeficiente en la tabla 11.

Tabla 11: Valores referenciales del criterio de Nash- Sutcliffe.

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

Fuente: (Cabrera, 2009).

Coeficiente de Nash-In.

El coeficiente de Nash para valores logarítmicos es una variante del coeficiente de Nash-Sutcliffe, este coeficiente evalúa dando hincapié en caudales en periodos de estiaje, el

coeficiente de Nash-In puede tomar valores que van desde $-\infty$ hasta 1, siendo 1 el valor más óptimo.(Cabrera, 2009).

Raíz del error medio cuadrático relativo (RRMSE).

El RRMSE es un indicador estadístico que cuantifica el error relativo que existe en una variable o parámetro u otra, toma valores que van desde 0, los valores que son más bajos indican que en el modelo hay menos errores.(Cabrera, 2009).

Volumen relativo del sesgo (RVB).

Ajam et al. (2004) indica que el coeficiente RVB puede tomar valores tanto positivos como negativos, donde subestima o sobreestima la serie observada respectivamente. Por lo tanto, el rango de valores es de $-\infty$ a $+\infty$. (Ajam et al.,2004).

RS Minerve incorpora una función objetivo que es flexible para el módulo de calibración y al mismo tiempo se puede adaptar a las necesidades y requerimientos del usuario. Los indicadores que se presentan en la función objetivo son los presentados en la tabla 12 y su ponderación depende del usuario.(García Hernández et al., 2020).

Tabla 12: Indicadores de la función objetivo en RS Minerve y su rango de valores.

Indicador	Rango de valores	Valor ideal
Nash	$-\infty$ a 1	1
Nash-In	$-\infty$ a 1	1
Pearson Correlation Coefficient	-1 a 1	1
Kling-Gupta Efficiency (KGE)	$-\infty$ a 1	1
Bias Score (BS)	$-\infty$ a 1	1
Relative Root Mean Square Error (RRMSE)	0 a $+\infty$	0
Relative Volume Bias (RVB)	$-\infty$ a $+\infty$	0
Normalized Peak Error (NPE)	$-\infty$ a $+\infty$	0
Peirce Skill Score (PSS)	-1 a 1	1
Overall Accuracy (OA)	0 a 1	1

Fuente: (García Hernández et al., 2020).

La ecuación a continuación representa la función Objetivo con los pesos que se han asignado respectivamente para la calibración del presente modelo hidrológico, tomando en cuenta los valores ideales que el manual técnico de RS Minerve señala.

$$OF = \max(\text{Nash} \cdot w_1 + \text{Nashln} \cdot w_2 + \text{Pearson} \cdot w_3 + \text{KGE} \cdot w_4 + \text{BS} \cdot w_5 - \\ - \text{RRMSE} \cdot w_6 - |\text{RVB} \cdot w_7| - |\text{NPE} \cdot w_8| + \text{PSS} \cdot w_9 + \text{OA} \cdot w_{10})$$

Validación

La validación se define como la operación que se realiza después de la calibración, es indispensable para la utilización de un modelo hidrológico. La validación como tal consiste en evaluar la calidad del modelo sobre un conjunto de datos que no han sido utilizados ni modificados en la calibración. (García Hernández et al., 2020).

2.6 Pronóstico hidrológico de caudales.

De acuerdo al IDEAM el pronóstico hidrológico tiene como objetivo principal el de informar y alertar con suficiente tiempo de antelación acerca del comportamiento de los principales cuerpos de agua del país, informando al Sistema Nacional de Gestión de Riesgos de Desastres y en si a la población en general de los eventos extremos que puedan ocurrir. (IDEAM, s.f.) .

El pronóstico hidrológico es uno de los aspectos más importantes de la hidrología. Una de las características en el tiempo moderno es la viabilidad de realizar pronósticos hidrológicos en tiempo real. Las redes de monitoreo hídrico ayudan a tomar ventaja de la información hidrológica en tiempo real para sistemas de alerta temprana. (Domínguez et al., 2010).

Rivera et al., (2008) señala que el “*pronóstico hidrológico puede expresarse de forma cualitativa o cuantitativa: Por ejemplo: el nivel del río para mañana se mantendrá en aumento, o el nivel del río será de 3 metros* ”. (Rivera et al., 2008).

Pronóstico cualitativo.

Para la emisión de un pronóstico cualitativo se analizan las precipitaciones ocurridas en los días anteriores al día de la elaboración del pronóstico hidrológico, luego se toma en cuenta las precipitaciones hacia el futuro, con base en eventos meteorológicos se suele realizar pronósticos para las siguientes 72 horas. (Rivera et al., 2008).

Pronóstico cuantitativo.

Domínguez et al. (2010) define que el pronóstico hidrológico cuantitativo en tiempo real es viable cuando se estudia aspectos como: el nivel de capacitación del personal, las capacidades informáticas, la cadena de registro hidrológico continuo, la disponibilidad de software integrador de flujos de información hidrometeorológica y la calidad de datos o información en tiempo real. (Domínguez et al., 2010).

3 Capítulo III: Área de estudio y metodología.

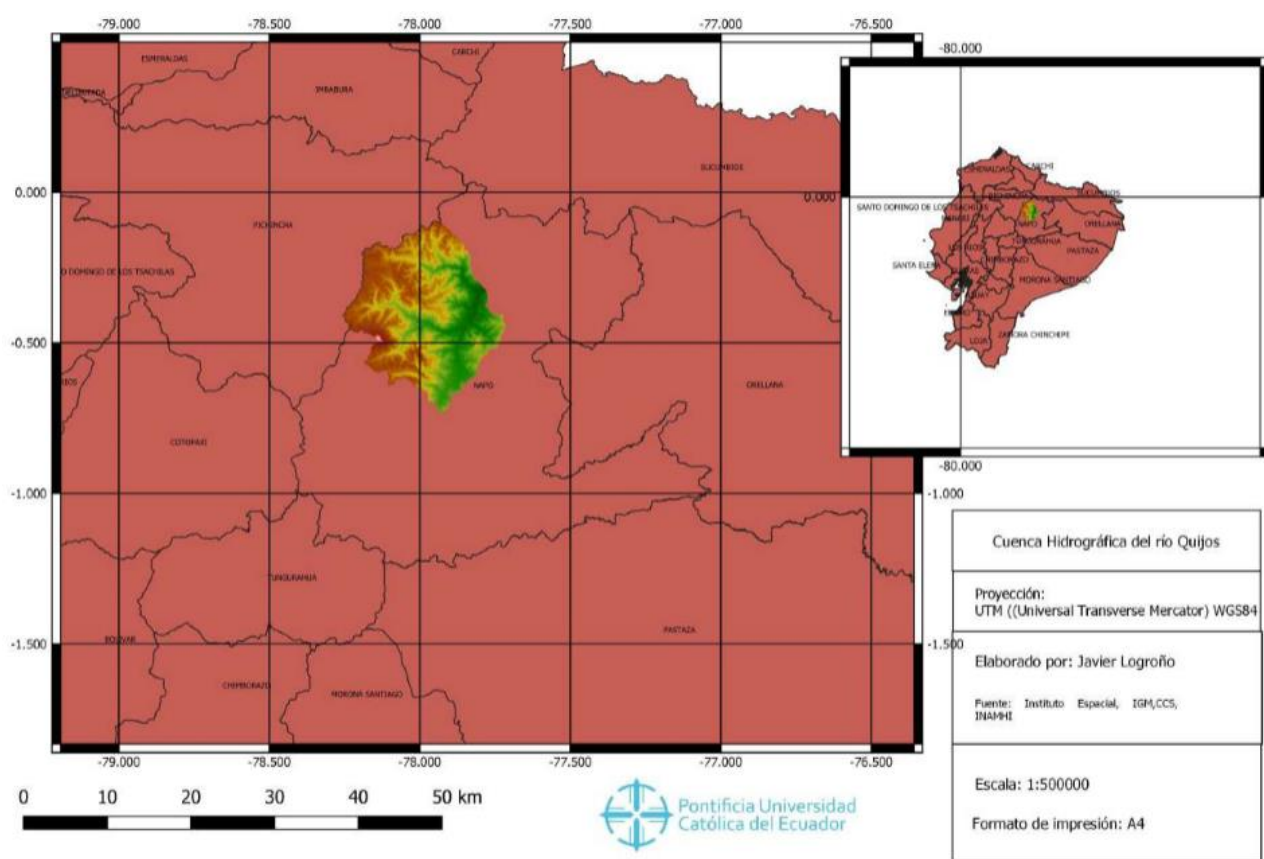
3.1 Caracterización de la cuenca hidrológica del río Quijos.

3.1.1 Localización de la cuenca.

La cuenca del río Quijos se localiza en la provincia de Napo, en la Amazonía ecuatoriana, el río Quijos es su principal sistema hidrográfico y este río es parte de la subcuenca del río Coca que pertenece a la cuenca del río Napo (PDOT del cantón Quijos, 2013).

La localización espacial en el mapa se puede observar en la figura 24 en referencia a la ubicación del Ecuador.

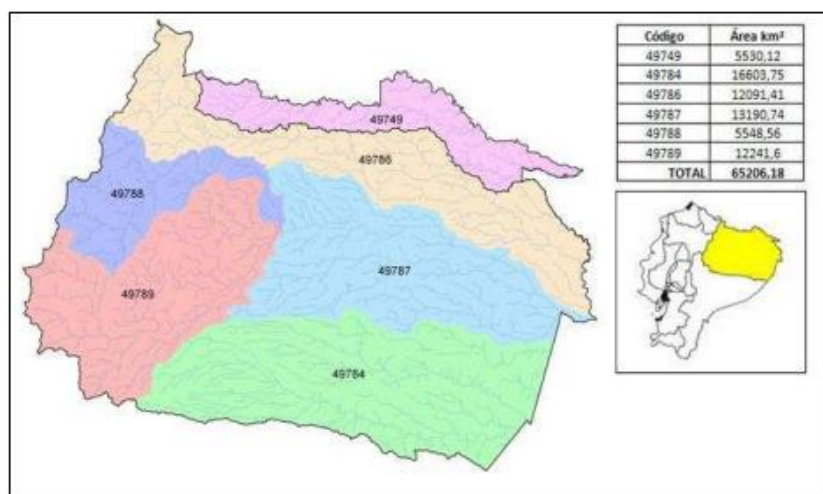
Figura 24: Ubicación de la cuenca del río Quijos.



Fuente: Elaborado por el autor.

La localización de la cuenca del río Quijos según la codificación Pfafstetter pertenece a la cuenca del río Amazonas en el primer nivel. La localización exacta de este río se encuentra en la unidad hidrográfica con codificación 49789 (figura 25) con demarcación para conocer la topología y caracterización de la cuenca, y su ubicación en un sistema de jerarquización hidrográfica.

Figura 25: Unidades Hidrográficas del Ecuador nivel 5 según la codificación Pfafstetter.



Fuente: Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN), 2008.

3.1.1.1 Selección de subcuencas y caracterización de la zona de estudio.

El criterio de selección de las subcuencas se realizó al definir el punto de salida de cada subcuenca, siendo estos puntos las ubicaciones de las estaciones hidrológicas que pertenecen a cada una de ellas y tomando como punto de salida de la cuenca la estación hidrológica H0719 Quijos DJ Oyacachi.

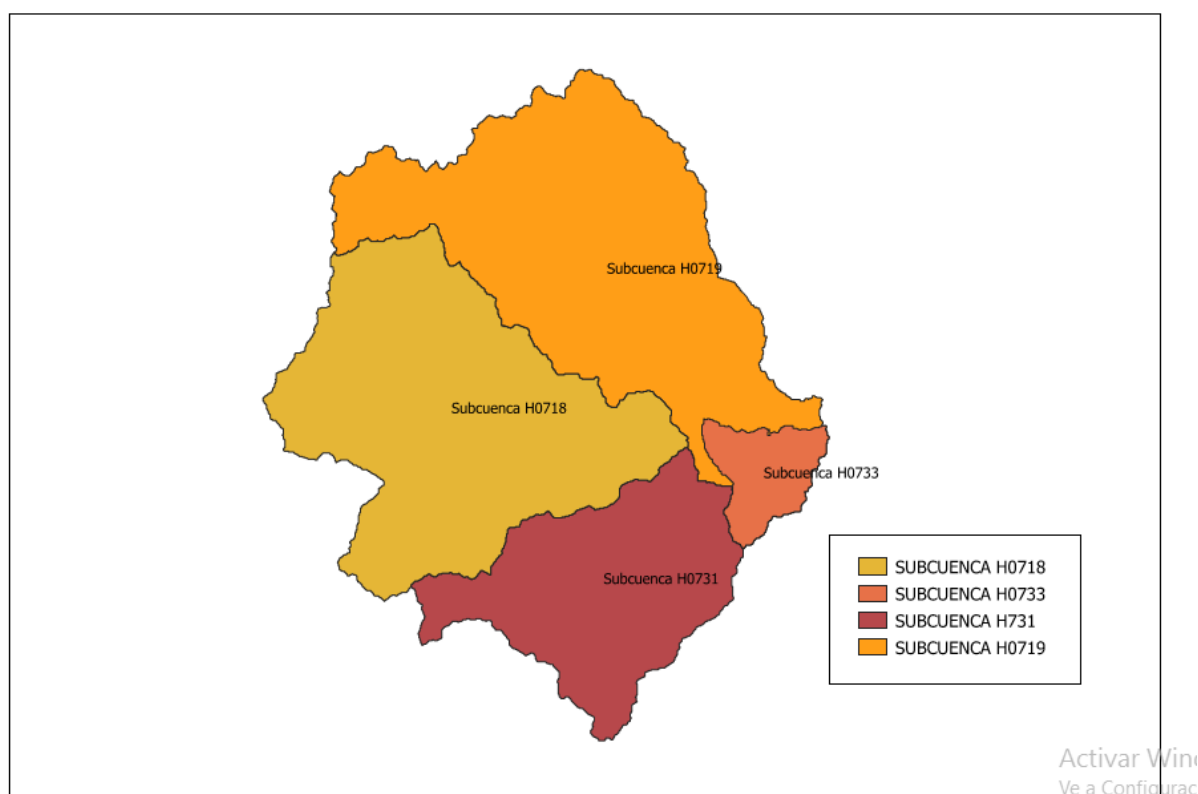
Tabla 13: Selección de subcuencas

Estación		Ubicación		
Código	Nombre	Latitud	Longitud	Elevación
H0718	QUIJOS EN BAEZA	0G 27' 16" S	77G 53' 11" W	1770
H0719	QUIJOS DJ OYACACHI	0G 18' 10" S	77G 46' 30" W	1490
H0731	COSANGA AJ QUIJOS	0G 20' 41" S	78G 51' 8" W	1740
H0733	QUIJOS AJ BORJA	0G 25' 3" S	77G 49' 0" W	1635

Fuente: Elaborado por el autor.

Como resultado se obtiene una cuenca dividida en 4 subcuencas, como se muestra en figura 26.

Figura 26: División de la Cuenca del río Quijos en subcuencas.



Fuente: elaborado por el autor.

3.1.2 Características físicas de la cuenca.

3.1.2.1 Características geomorfológicas de la cuenca hidrográfica del río Quijos.

Área de la cuenca hidrográfica del río Quijos.

El área de estudio que representa la zona de estudio se ha obtenido mediante la plataforma QGIS con un valor de 2453 km² de área.

Perímetro de la cuenca del río Quijos.

El perímetro de la cuenca se ha definido mediante la plataforma QGIS, obteniéndose un valor de 325 km.

Longitud del río Quijos.

Desde el nacimiento del río Quijos hasta la confluencia con el río Papallacta tiene una longitud aproximada de 36 km. (CELEC, 2015).

Mediante la plataforma de QGIS se obtuvo el valor de la longitud del río que empieza desde el nacimiento del río Quijos hasta la ubicación de la estación hidrológica H0719 Quijos DJ Oyacachi y las longitudes de los ríos de aforo que pertenecen a la cuenca de estudio.

Tabla 14: Longitud de ríos.

Río	Longitud (km)
Quijos	36,190
Cosanga	32,416
Borja	10,190
Papallacta	16,444
Oyacachi	37,734

Fuente: Elaborado por el autor.

3.1.2.2 Criterios de forma de la cuenca del río Quijos.

Factor de compacidad.

El factor de compacidad de la Cuenca hidrográfica representada para este estudio, mediante los datos obtenidos, tiene un valor de:

$$Kc = 0.28 * \frac{325}{2453^{\frac{1}{2}}} = 1.83$$

El valor de Kc de la cuenca del río Quijos denota que la cuenca tiene una forma oval oblonga a rectangular oblonga. (Gorii et al., 1997).

Factor de forma.

El factor de forma que representa a la cuenca hidrográfica del río Quijos, zona de estudio del presente estudio, posee el siguiente valor:

$$Kf = \frac{2453}{52.557^2} = 0.8$$

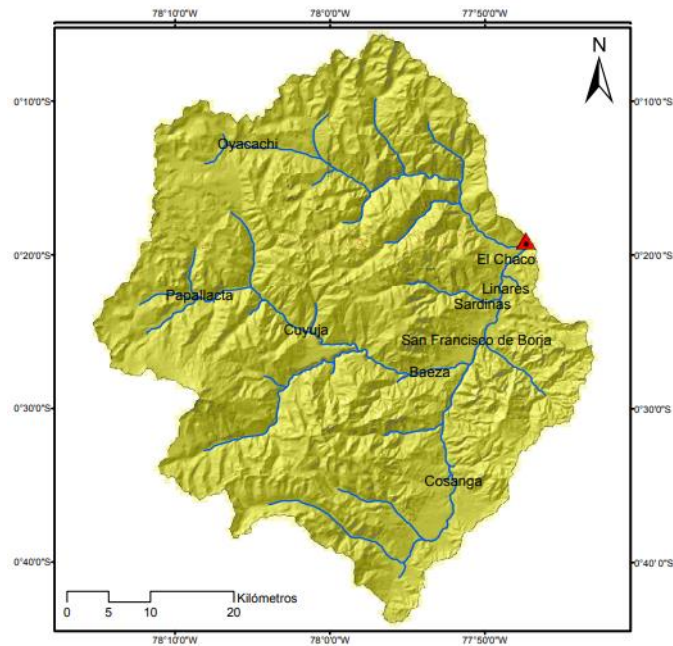
La cuenca hidrográfica del río Quijos posee un factor de forma relativamente bajo en comparación a otras cuencas del mismo tamaño.

Curva hipsométrica correspondiente al río Quijos.

La curva hipsométrica que corresponde a la superficie del río Quijos en la estación hidrográfica Quijos DJ Oyacachi H0719 se obtuvo de la Publicación de la Información Generada por las 35 Estaciones Hidrológicas Automáticas publicado por le INAMHI (gráfico 1).

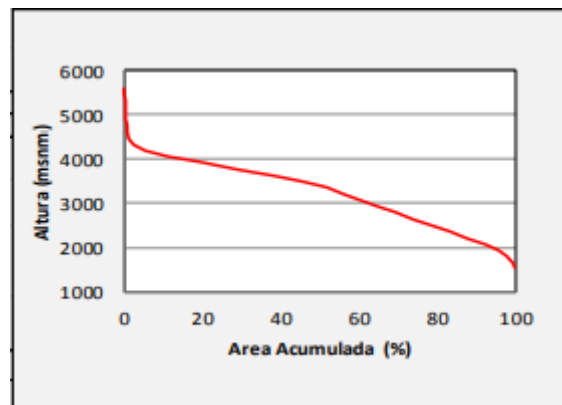
Área de análisis de la cuenca para la realización de la curva hipsométrica:

Figura 27: Cuenca del río Quijos con aforo en la estación H0719.



Fuente: (INAMHI, 2013).

Gráfico 1: Curva Hipsométrica de la cuenca del río Quijos con aforo en la estación H0719.



Fuente: (INAMHI, 2013)

En base a los criterios de Monsalve (2008) se puede evidenciar que la cuenca del río Quijos posee una geomorfología irregular, especialmente en la parte alta, así mismo reflejando este resultado en el PDOT del cantón Quijos que señala que las cercanías del río poseen un paisaje muy agudo perteneciente a una vertiente andina alta, y de la misma forma posee terrazas cercanas al río donde los pueblos están asentados. (Monsalve, 2008).

Del mismo modo la cuenca del río Quijos posee una curva hipsométrica tipo A (figura 5) la cual caracteriza a una cuenca joven, lo que significa que sus ríos son jóvenes y poseen

un gran poder erosivo, además de poseer una velocidad de flujo del agua alta. El pico más alto de la curva puede ser descartado, ya que representa la influencia de las elevaciones que rodea a la cuenca (Horna, 2016).

3.1.3 Características meteorológicas e hidrológicas de la cuenca.

3.1.3.1 Caracterización meteorológica de la cuenca Quijos.

Caracterización climática.

La cuenca del río Quijos posee cuatro pisos de clima de acuerdo a la clasificación de Pourrut Pierre y Koeppen (1995). Clima polar Andino o Nieval que se encuentra en las zonas aledañas del volcán Antisana y Cayambe, clima cálido tropical húmedo en la parte oriental donde se encuentra la mayoría de vegetación en estado natural, clima templado subtropical Semi-húmedo que se encuentra en la parte baja de la subcuenca donde se hayan los asentamientos humanos en su mayoría y clima Templado Semi-humedo en la parte occidental. La estación más lluviosa de la cuenca se presenta en los meses de Abril a Agosto; mientras que la estación más seca empieza en septiembre y finaliza en febrero.(PDOT del cantón Quijos, 2013).

Además, Andrade A. (2016) señala que en términos generales la cuenca del río Coca donde pertenece a la cuenca del río Quijos, presenta un clima cálido-húmedo con lluvias constantes durante todo el año.

Selección de estaciones meteorológicas.

La tabla 15 muestra la información de las estaciones meteorológicas seleccionadas en la cuenca del río Quijos. De acuerdo a Horna (2016). La estación M0188 se encuentra en la zona alta de la cuenca, mientras que la estación M1124 se encuentra en una zona media.

Tabla 15: Selección de estaciones Meteorológicas.

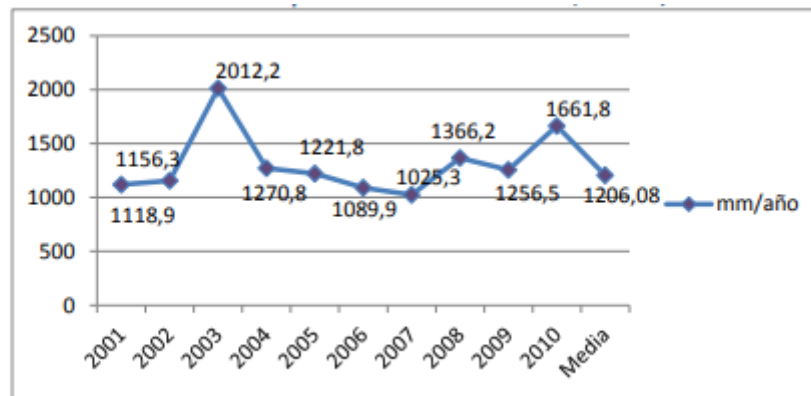
Código	Nombre	Entidad	Ubicación		Altura
			Latitud	Longitud	
M0188	Papallacta	INAMHI	-0.670842	-77.924178	2240 m
M1124	Sierra Azul	INAMHI	-0.380611	-78.141389	3150 m

Fuente: INAMHI y PDOT del cantón Quijos (2013).

3.1.3.2 Precipitación.

Quijos reporta una precipitación multianual de 1206,68 mm/año en su zona más alta (zona de la estación M0188).

Gráfico 2: Precipitación media multianual (mm/año) en la Cuenca del río Quijos.



Fuente: Plan de Ordenamiento Territorial del cantón Quijos e INAMHI.

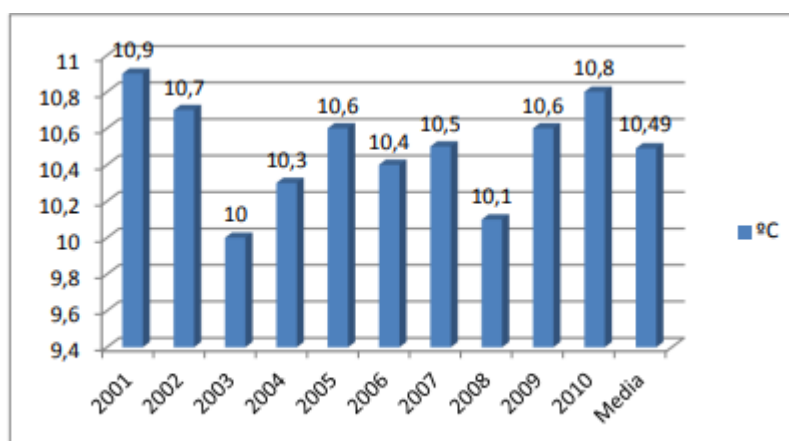
En el gráfico 2, se observa que, la parte baja de la cuenca presenta precipitaciones promedio de 2000 a 3000 mm en los sectores del valle de Quijos, mientras que la parte más oriental del cantón cerca de la cordillera de Guacamayos y el volcán Sumaco las precipitaciones promedio están entre 3200 a 4500 mm/año.(PDOT del cantón Quijos, 2013).

3.1.3.3 Temperatura.

En referencia a la temperatura de la cuenca, Andrade A. (2016) describe que la temperatura es altamente variable, misma que es producto de las diferencias altitudinales sobre el nivel del mar, teniendo una temperatura media anual que va desde los 11°C hasta alcanzar los 34°C en las partes altas y bajas de la cuenca respectivamente

El PDOT del cantón Quijos menciona que las estaciones meteorológicas M0188 y M1124 reportan dos realidades. Para la zona alta (estación M0188 Papallacta) posee temperaturas medias de 10.5°C (gráfico 3) mientras que en la parte baja de la cuenca presenta temperaturas que oscilan en promedio de 16°C a 19°C, también se caracteriza por tener altibajos abruptos producto de las precipitaciones de la zona, los datos obtenidos de la estación Sierra Azul indica temperaturas anuales de 14.5 °C.(PDOT del cantón Quijos, 2013).

Gráfico 3: Temperatura multianual en °C.



Fuente: Plan de Ordenamiento Territorial del cantón Quijos e INAMHI.

3.1.3.4 Evapotranspiración.

La evapotranspiración un parámetro que no se encuentra fácilmente en una base de datos climatológica, RS Minerve integra la posibilidad de calcular la evapotranspiración de manera automática o ingresar a la base de datos valores diarios. Los métodos de cálculo de evapotranspiración en RS Minerve son: Turc, McGuinness, Oudin, ETP uniforme.(Foehn et al., 2019).

La presente investigación utiliza dos metodologías para el cálculo de la evapotranspiración, la primera usa el RS Minerve y la segunda toma los valores calculados del software CROPWAT 8.0.

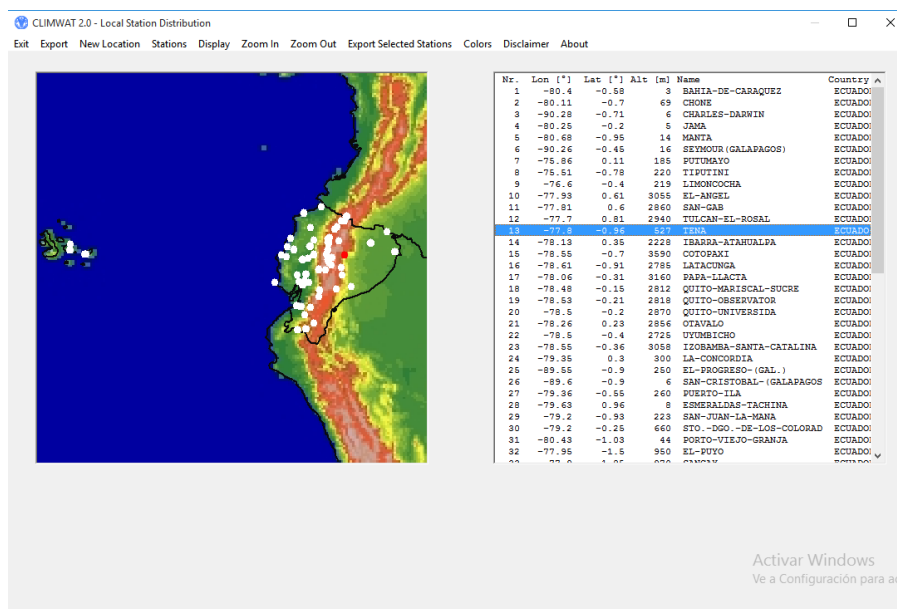
RS Minerve calcula la evapotranspiración automáticamente, empleando las ecuaciones de Turc. Para este proceso se crea la base de datos del modelo con información de temperatura diaria, además las ecuaciones requieren la ubicación del centroide de la cuenca.(García Hernández et al., 2020).

En el segundo método, se importa la información diaria de la evapotranspiración calculada por el software CROPWAT 8.0, que es una herramienta de apoyo para el estudio climatológico y cálculo de requisitos de agua y riego de cultivos desarrollado por la División de Desarrollo de Tierras y Aguas de la FAO¹ (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (FAO, 2021).

¹ FAO: Food and Agriculture Organization of the United Nations (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (FAO, 2021).

CROPWAT 8.0 utiliza la base de datos meteorológicos CLIMWAT² donde se ingresa las coordenadas geográficas de las estaciones donde se ubica la zona en estudio como muestra a en la figura 28.

Figura 28: Captura de pantalla de la Base de datos de CLIMWAT.

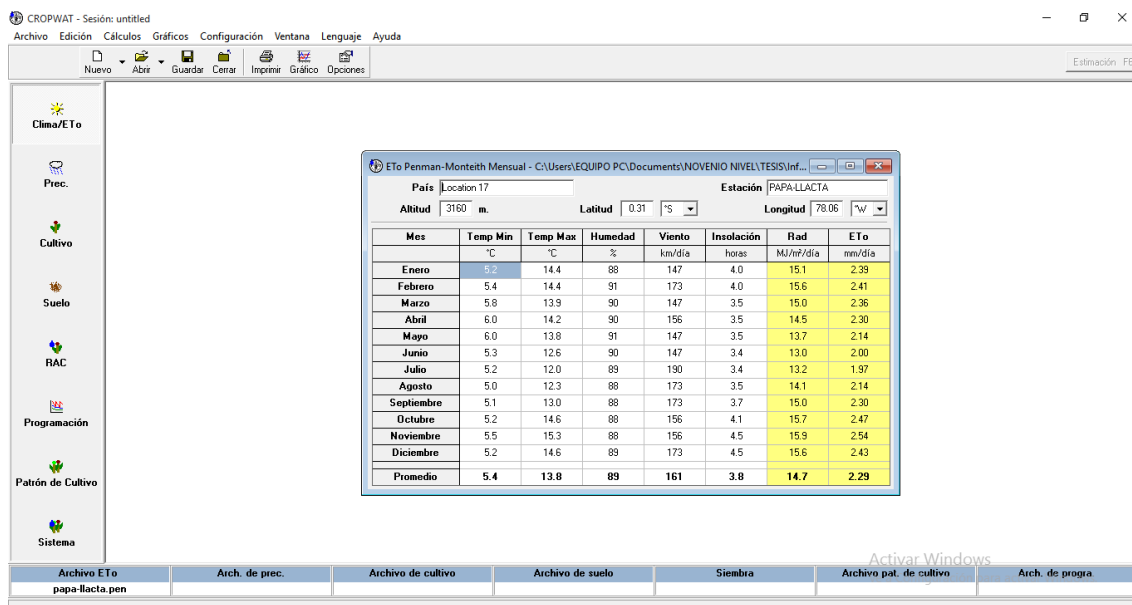


Fuente: CLIMWAT para CROPWAT.

CLIMWAT muestra las estaciones de cada país o las más cercanas a la ubicación ingresada, en el caso de la estación M0188, se escogió la estación Papallacta, mientras que para la estación M1124 se escogió la estación Tena, luego se descargan los datos para ingresar al software CROPWAT 8.0 que realiza el cálculo de evapotranspiración obteniendo los valores diarios de cada mes como se muestra en las figuras 29 y 30. (FAO, 2021).

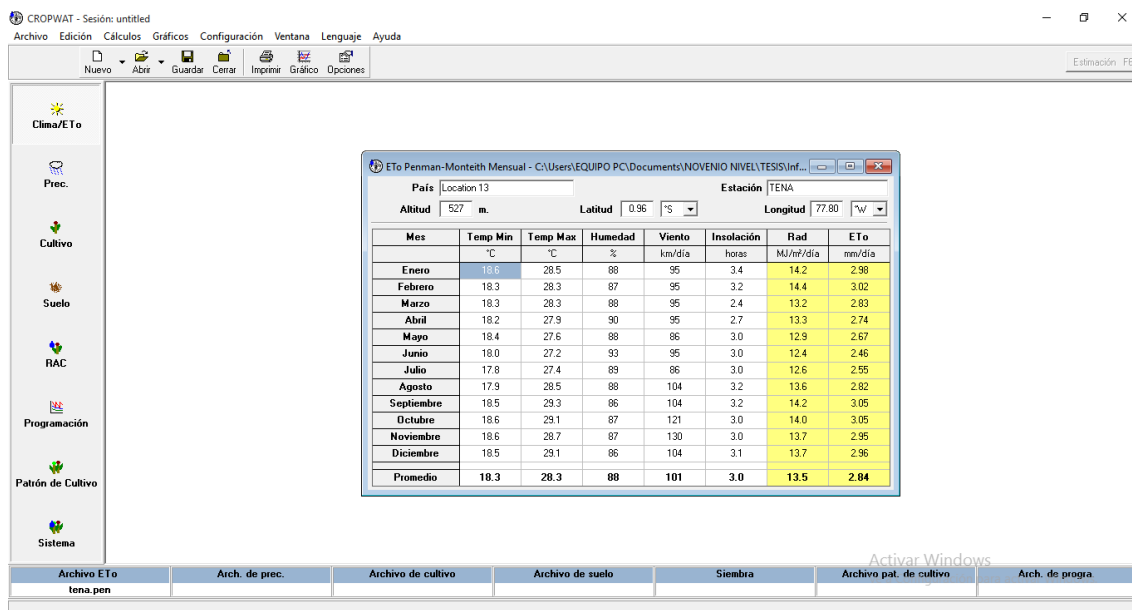
² CLIMWAT: es una base de datos climática que se utilizara en combinación con el programa informático CROPWAT y ofrece datos agroclimáticos observados de más de 5000 estaciones en todo el mundo distribuidas como se muestra a continuación. (FAO, 2021).

Figura 29: Cálculo de ETP para la estación M0188 en Cropwat, con la estación más cercana de Climwat en Papallacta.



Fuente: CROPWAT 8.0

Figura 30: Cálculo de ETP para la estación M1124 en Cropwat, con la estación más cercana de Climwat, Napo.



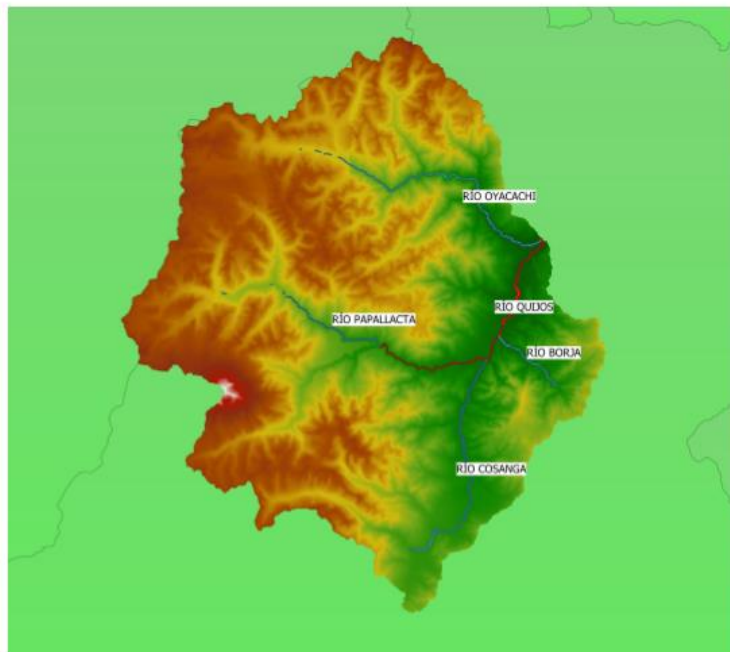
Fuente: CROPWAT 8.0

Caracterización hidrológica de la cuenca Quijos.

El plan de desarrollo territorial del cantón Quijos señala que “La cuenca del río Quijos recibe aportes de los ríos Papallacta, Cosanga y Borja, siendo los ríos de principales

afluentes, pero también se destacan la microcuenca de los ríos Chalpi, Tampo, Tumiguina, Blanco, Quinjua a y Victoria dentro de la subcuenca del río Papallacta; las microcuencas de los ríos Aliso, Yanayacu, Arenillas, Bermejo, que forman parte de la subcuenca del río Cosanga; y las microcuencas de los ríos Borja, Huagrayacu, Machángara y Parada larga, que confluyen directamente al río Quijos”.(PDOT del cantón Quijos, 2013).

Figura 31: Mapa de la cuenca del río Quijos.



Fuente: elaborado por el autor.

3.2 Tratamiento y análisis de datos.

3.2.1 Procesamiento de la información de datos meteorológicos.

Recopilación de información meteorológica.

Para la recopilación de información meteorológica, se ha recurrido a la base de datos del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador (INAMHI), que consta de la información de los siguientes datos históricos de las estaciones M0188 Papallacta y M1124 Sierra Azul:

- Precipitación total diaria.
- Precipitación total mensual.
- Temperatura máxima diaria.

- Temperatura mínima diaria.
- Temperatura media diaria de 3 observaciones.
- Temperatura máxima media mensual.
- Temperatura mínima media mensual.
- Temperatura media mensual.
- Evaporación potencial diaria.
- Evaporación Potencial Media Mensual.
- Humedad relativa media diaria.
- Humedad Relativa Media Mensual.
-

la información meteorológica a utilizarse es la Precipitación total diaria y Temperatura media diaria de 3 observaciones, que son datos de entrada para el modelo hidrológico GR4J.

Las tablas 16 y 17 muestran la información disponible de las estaciones

Tabla 16: Información disponible en la estación M0188.

Estación		Ubicación			Información		
Código	Nombre	Latitud	Longitud	Elevación	Periodo de registro	Datos	Entidad
M0188	PAPALLACTA	0G 22' 50.2" S	78G 8' 29" W	3150	1995-2015	Precipitación Total Diaria	INAMHI
M1124	SIERRAZUL	0G 40' 15.03"S	77G 55' 27.04'	2240	1996-2015	Precipitación Total Diaria	INAMHI

Fuente: elaborado por el autor.

Tabla 17: Información disponible en la estación M1124.

Estación		Ubicación			Información		
Código	Nombre	Latitud	Longitud	Elevación	Periodo de registro	Datos	Entidad
M0188	PAPALLACTA	0G 22' 50.2" S	78G 8' 29" W	3150	1995-2015	Temperatura Media Diaria de 3 Observaciones	INAMHI
M1124	SIERRAZUL	0G 40' 15.03"S	77G 55' 27.04'	2240	1996-2015	Temperatura Media Diaria de 3 Observaciones	INAMHI

Fuente: elaborado por el autor.

El periodo de estudio inicia el 01 de enero del 2005 hasta el 31 de diciembre 2015, ya que es el periodo con mayor disponibilidad de datos existentes.

Procesamiento de datos meteorológicos.

La información meteorológica, precipitación total diaria y temperatura media diaria que se obtuvo mediante la base de datos del INAMHI, teniendo el siguiente estado de disponibilidad de datos:

3.3 Aplicación del modelo GR4J en la cuenca del río Quijos.

3.3.1 Generación de entradas para el modelo.

Uso de herramienta GIS.

Preparación de shapefiles para incorporar a RS Minerve.

Shapefile es un formato sencillo y no topológico que se usa para almacenar información de ubicaciones geométricas y entidades geográficas, entidades que pueden representar puntos, líneas o polígonos. (ArcGIS, 2016).

Los archivos shapefile que se configuran (a través del software Qgis³) para incorporar a RS Minerve son 3: un archivo de polígonos que representa la cuenca y su división en subcuencas, puntos de unión y salidas y líneas que representa la ubicación y el tránsito de los ríos.

Los campos necesarios para identificar las propiedades geométricas de los shapefiles como longitud, área y ubicación de centroides, como se muestra en las figuras 32, 33 y 34.

Figura 32: Descripción de la tabla de atributos del Shapefile de subcuencas.

NUMERO	X	Y	Z	ID_cuenca	AREA	UnionAbajo
1 subcuenca 1	825528.861	9953019.436	3835.000	Cuenca Papalla...	899699961.500	H0718
2 subcuenca 2	840145.948	9970040.032	2758.000	Cuenca Oyacachi	936904182.200	H0719
3 subcuenca 3	841633.226	9935116.701	2760.000	Cuenca Cosanga	504492167.300	H0731
4 subcuenca 4	858623.991	9947172.601	1937.000	Cuenca Borja	105050951.600	H0733

Fuente: QGIS.

Figura 33: Descripción de la tabla de atributos del Shapefile de ríos.

Nombre	UnionAbajo	Longitud	Alt_max	Alt_min	Jo_media
1 Rio Papallacta	H0718	26784.281	3229.00	2044.00	4.424
2 Rio Quijos	H0719	36487.747	2044.00	1442.00	1.650
3 Rio Cosanga	H0731	33895.351	2488.00	1680.00	2.384
4 Rio Borja	H0733	10436.511	1971.00	1634.00	3.229
5 Rio Oyacachi	H0719	41032.596	3320.00	1442.00	4.577

Fuente: QGIS.

³ QGIS es un Sistema de Información Geográfica (SIG) de código abierto bajo GNU (General Public License). Es una herramienta de aplicación profesional y explorados de archivos espaciales. (QGIS, s.f.).

Figura 34: Descripción de la tabla de atributos del Shapefile de puntos de salida de las subcuencas.

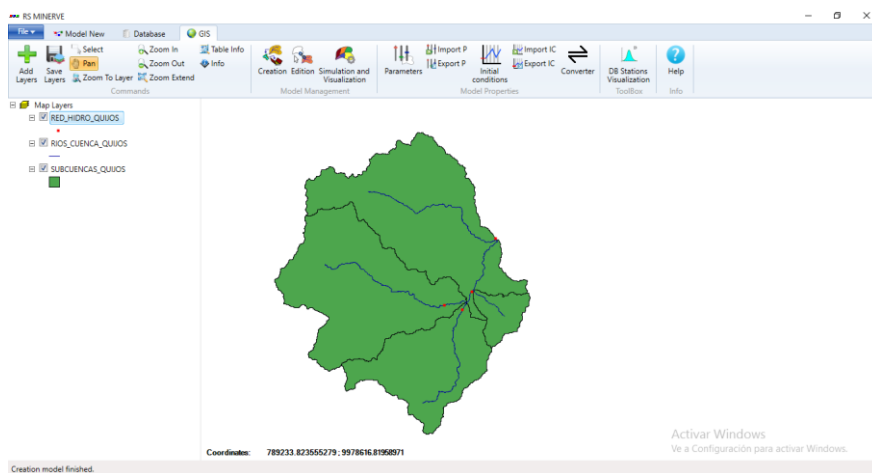
	CODIGO	NOMBRE	UnionAbajo
1	H0719	QUIJOS D.J. OYACACHI	
2	H0731	COSANGA A.J. QUIJOS	Rio Quijos
3	H0718	QUIJOS EN BAEZA	Rio Quijos
4	H0733	QUIJOS AJ BORJA	Rio Quijos

Fuente: QGIS.

Incorporación de archivos shapefile de QGIS a RS Minerve.

Se importan los archivos shapefile a RS Minerve a través de la pestaña “GIS” (figura 35) de manera que se simule el recorrido del agua a través de la cuenca.

Figura 35: Herramienta GIS de RS Minerve.



Fuente: RS Minerve.

A través del botón “Creation” en el menú “Model Management” se indica los archivos shapefile que corresponden a las capas de ríos, los puntos de unión o salida y la capa que representan la subdivisión de subcuencas. (Foehn et al., 2019). El procedimiento se observa en la figura 36.

Figura 36: Panel de configuración de objetos hidrológicos.

The screenshot shows the 'Configuration' panel with three main sections: Subbasins, Junctions, and Rivers. Each section has a 'Create' checkbox and a 'Properties (optional)' section.

- Subbasins:**
 - Layer name: SUBCUENCAS QUIJOS
 - Basins name: ID_cuenca
 - Junctions ID: UnionAbajo
 - Properties (optional):
 - Compute Area, X,Y from shapefile
 - Altitude (Z): Z
 - Zone:
 - Create submodels based on Basins ID:
- Junctions:**
 - Layer name: RED_HIDRO QUIJOS
 - Junctions name: CODIGO
 - Junctions ID: CODIGO
 - Rivers ID: UnionAbajo
 - Properties (optional):
 - Zone:
- Rivers:**
 - Layer name: RIOS_CUENCA QUIJOS
 - Rivers name: Nombre
 - Rivers ID: Nombre
 - Junctions ID: UnionAbajo
 - Properties (optional):
 - Compute Length from shapefile
 - Zone:

At the bottom, there is a checkbox for 'Create Model in a new submodel' and a button for 'Attribute table info (selected layer in the legend)'.

Fuente: RS Minerve.

La figura 36 describe en la selección de “Subbasins”:

- Layer name: La capa o shapefile que representa las subcuencas.
- Basins name: el identificador de la tabla de atributos que representa los elementos de dicha capa.
- Junctions ID: la propiedad de la capa que contiene el identificador de los puntos de confluencia (union, desfogue o salida) de la cuenca o subcuencas.
- Altitude (Z): propiedad de la capa o shapefile que contiene la altura en el centro de gravedad de cada una de las subcuencas.

Al momento de realizar la selección de “Junctions” se tiene las siguientes opciones:

- Layer name: La capa o shapefile que representa las confluencias.
- Junctions name: el atributo que contiene los nombres de los puntos de confluencia o salida.
- Junctions ID: el atributo de la capa o shapefile que vincula a los ríos aguas abajo.
- Rivers ID: el atributo de la capa o shapefile que contiene a los ríos que se vincularán aguas abajo.

Y de la misma manera, en la selección de “Rivers”:

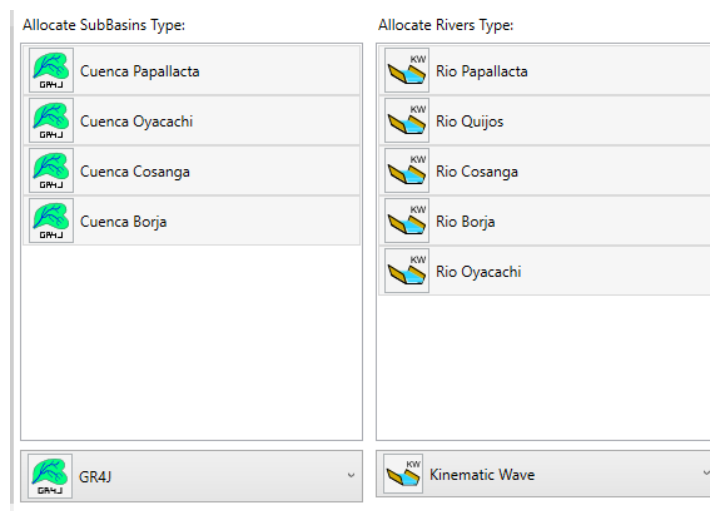
- Layer name: La capa o shapefile que representa los ríos existentes en la cuenca.

- Rivers name: el atributo de la capa o shapefile que contiene los nombres de los ríos.
- Rivers ID: el atributo que los ríos que se vincularán aguas debajo de los puntos de confluencia.
- Junction ID: el atributo de la capa o shapefile de las uniones aguas abajo a las que se vincularán los ríos.

Definiciones adaptadas de (Foehn et al., 2019).

Luego se asignan los objetos de que representarán a los elementos de las subcuencas y ríos:

Figura 37: Asignación de objetos a los elementos de la cuenca.

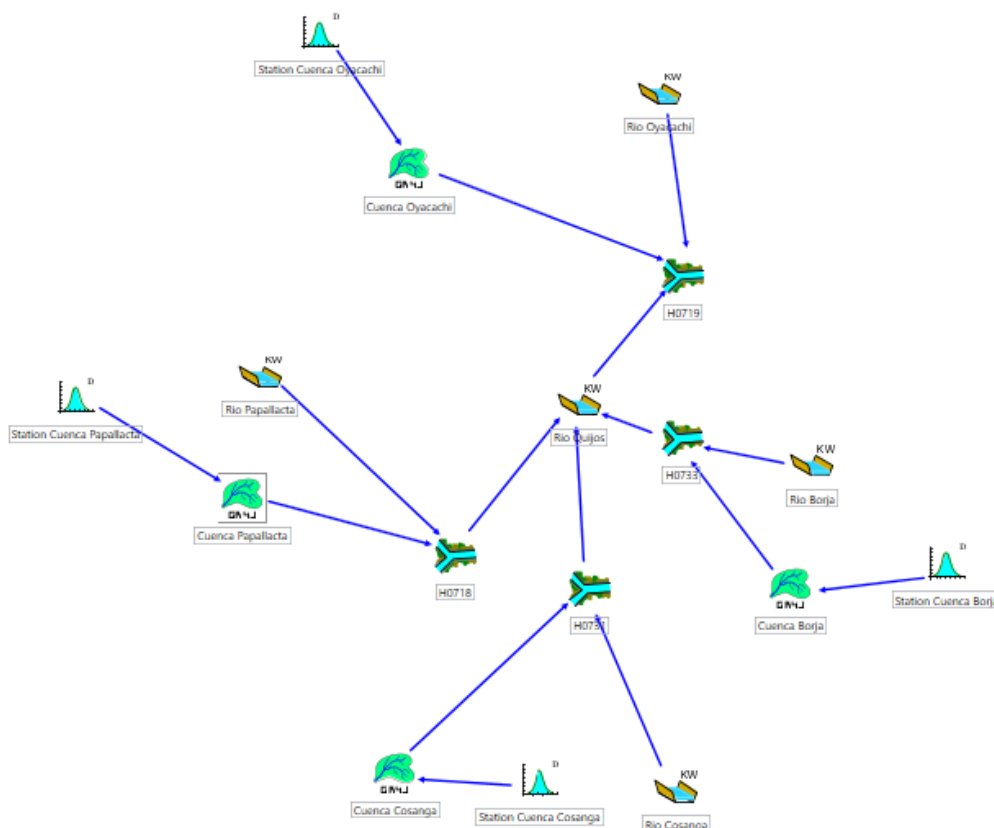


Fuente: RS Minerve.

Se selecciona el objeto hidrológico que corresponde al modelo que representará cada subcuenca, así como el objeto que representa el o los ríos que se encuentran en la cuenca del río Quijos. Los mapas generados en QGIS no solo representan la ubicación geográfica del área de estudio, sino que también posee importancia para analizar aspectos como la evapotranspiración.(Iparraguirre & Bramont, 2015).

Iparraguirre & Bramont (2015) menciona además que el modelo GR4J, requiere solo de información de precipitación, temperatura y evapotranspiración, obteniendo resultados satisfactorios, usando estos cuatro indicadores que permite que la iteración al momento de la calibración sea más liviana con una misma posibilidad de datos aceptables.(Iparraguirre & Bramont, 2015).

Figura 38: Captura de pantalla del Modelo de la cuenca resultado de la herramienta GIS de RS Minerve.



Fuente: RS Minerve.

Incorporación de datos hidrológicos y meteorológicos.

Se crea una Database (Base de Datos), donde se agrega los datos hidrológicos y meteorológicos recopilados.

Formato para el ingreso de datos en RS Minerve se muestra en la tabla 26.

Tabla 26: Formato de ingreso de datos a la Base de datos de RS Minerve.

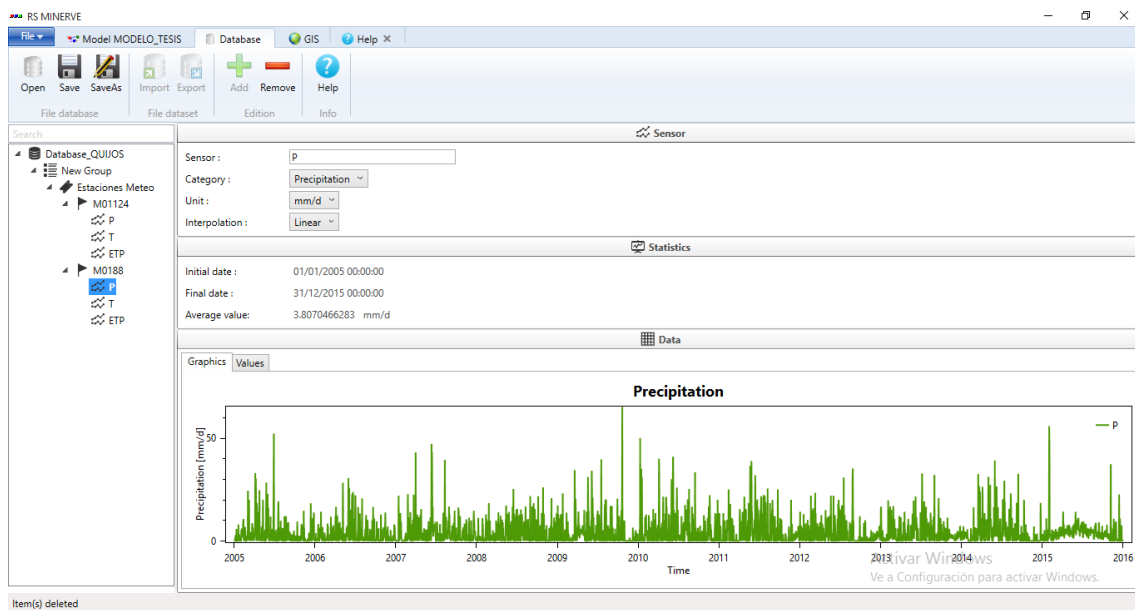
Date	Value
DD-MM-AAAA HH:MM:SS	**

Elaborado por el autor

Fuente: RS Minerve.

El periodo de estudio seleccionado empieza desde el 01 de enero del año 2005 hasta el 31 de diciembre del año 2015, los datos una vez completados se importan a la plataforma RS Minerve como se aprecia en la siguiente figura 39.

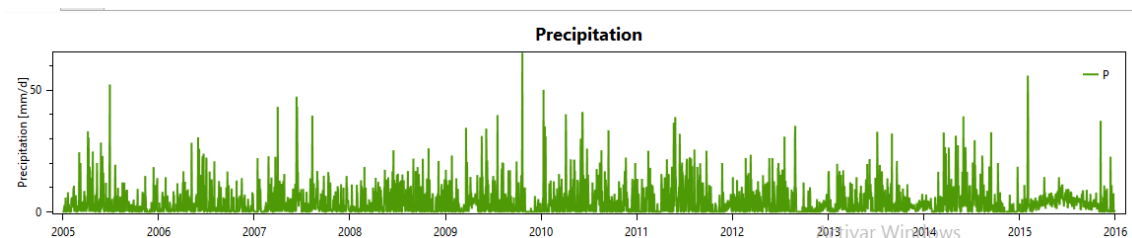
Figura 39: Captura de pantalla de la importación de datos meteorológicos a la base de datos del modelo.



Fuente: RS Minerve.

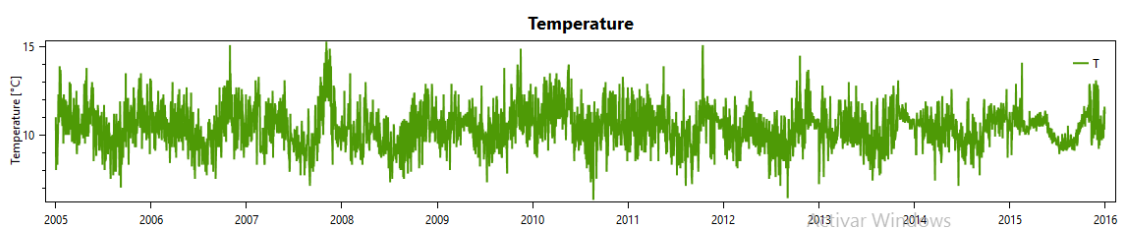
La herramienta de Database de RS Minerve permite posicionar las estaciones de medición meteorológica e hidrológica reales en el modelo a través de las coordenadas UTM donde están ubicadas, y una vez que se ingresa los datos se muestra los gráficos de la información ingresada automáticamente como se muestran a continuación. (Foehn et al., 2019).

Gráfico 4: Datos de precipitación de la estación M0188.



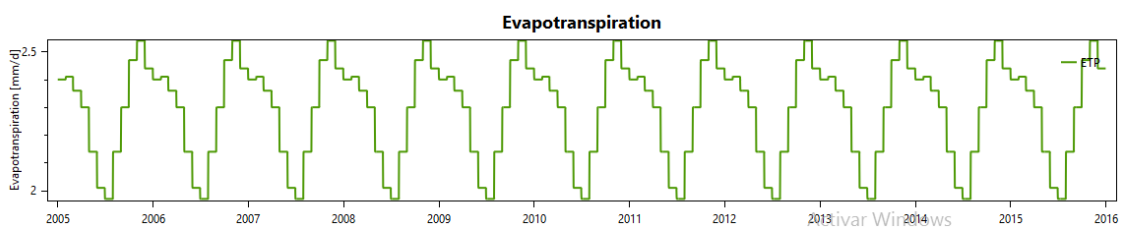
Fuente: RS Minerve.

Gráfico 5: Datos de temperatura de la estación M188.



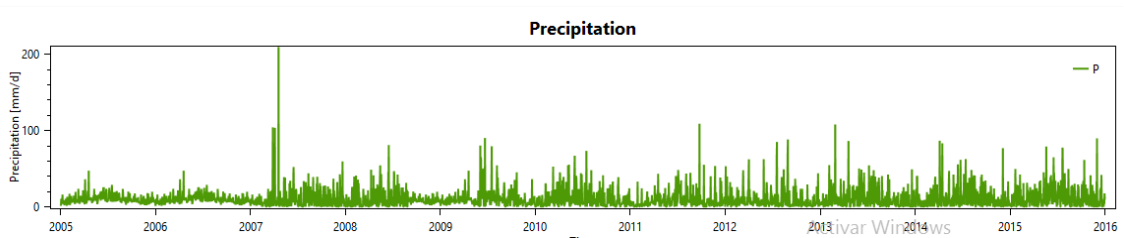
Fuente: RS Minerve.

Gráfico 6: Datos de Evapotranspiración de la estación M188, calculada a partir de CROPWAT 8.0.



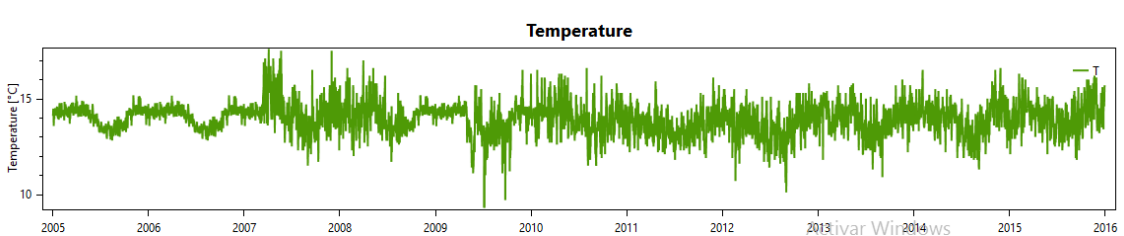
Fuente: RS Minerve.

Gráfico 7: Datos de precipitación de la estación M1124.



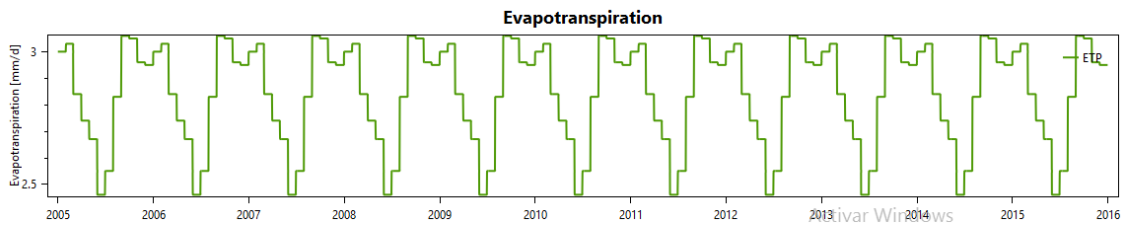
Fuente: RS Minerve.

Gráfico 8: Datos de temperatura de la estación M1124.



Fuente: RS Minerve.

Gráfico 9: Datos de Evapotranspiración de la estación M1124, calculada a partir de CROPWAT 8.0.

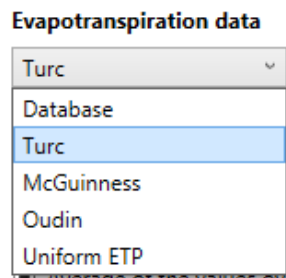


Fuente: RS Minerve.

Para el cálculo de la evapotranspiración en RS Minerve, el procedimiento emplea las ecuaciones de Turc (inciso 2.1.2 – Evapotranspiración). Ecuaciones que requieren como información base el centroide de la cuenca además de la información de temperatura que ya importada en la Database. (Foehn et al., 2019).

Para ingresar la información se escoge el botón “Edit” del menú Settings.

Figura 40: Selección del método TURC para el cálculo de la ETP en RS Minerve.



Fuente: RS Minerve.

Figura 41: Incorporación de datos para el cálculo de evapotranspiración en RS Minerve.

Evapotranspiration data

Turc

Latitude (°) only necessary for Turc, McGuinness and Oudin methods

Longitude (°) only necessary for Turc and McGuinness methods

Uniform ETP= (mm/d) only necessary for Uniform ETP method

Fuente: RS Minerve.

área de cada una de las cuencas ha sido calculada automáticamente por la herramienta GIS.

Figura 43: Cuadro de edición de parámetros del modelo GR4J.

Name	Value	Unit	
A		m2	
X1	0.05	m	
X2	0	m	
X3	0.05	m	
X4	1.7	d	

Fuente: RS Minerve.

El ancho de los ríos se calculó realizando un promedio mediante el software QGIS obteniendo un resultado medio de 68.993 metros de ancho del río Quijos. Con la misma plataforma se puede estimar la pendiente del cauce.

Para el coeficiente de Strickler se coloca el valor del software, ya que es un valor cercano al coeficiente que representa a ríos grandes con un ancho de superficie de agua mayor a 30m con sección irregular, además de que las paredes en canales de cursos naturales también concuerdan con la descripción de ríos de montaña, con fondo de grava gruesa y rocas grandes, paredes laterales poco inclinadas, como se muestra en la tabla 27. (Mendoza, 2010).

Tabla 27: Tabla para el coeficiente *K* para la de Strickler.

Clase	Naturaleza de las paredes	K
D	Cursos de agua naturales	.
.	pequeños cursos de agua en zonas planas, limpios, rectos y sin estancamientos de agua	30-40
.	pequeños cursos de agua en zonas planas, limpios, sinuosos y con estancamientos de agua	22-30
.	tramos lentos, con vegetación (pastos) y estanques profundos	13-20
.	tramos con mucha hierba, estanques profundos, notablemente obstaculizados por árboles	07 a 13
.	ríos de montaña, con fondo de grava media y gruesa y pocas rocas, paredes laterales poco inclinadas	20-33
.	ríos de montaña, con fondo de grava gruesa y rocas grandes, paredes laterales poco inclinadas	14-25
E	Áreas de expansión de cursos de agua	
.	con pasto	20-40
.	con áreas cultivadas	20-50
.	con arbustos	14-29
.	con muchos árboles	08 a 13
F	Ríos grandes (ancho de la superficie del agua mayor a 30 m)	
.	sección regular sin rocas o vegetación	17-40
.	sección irregular	10 a 29

Fuente: Nuovo Colombo - Manuale dell'Ingegnere - H-29.

Se completa los datos referentes a los parámetros del río Quijos, como se muestra en la figura 44.

Figura 44: Cuadro de edición de parámetros del río Kinematic Wave.

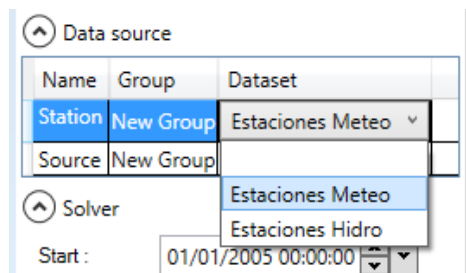
Name	Value	Unit	
L	36409.7067451685	m	
B0	68.993	m	
m	1	-	
J0	0.0314	-	
K	30	m ^{1/3} /s	
N	1	-	

Fuente: RS Minerve.

Resultado de la modelación hidrológica en el punto de salida de la cuenca H0719.

Se enlaza la base de datos con los objetos, de esta forma se incluye la información meteorológica en las estaciones virtuales, y se enlaza en el apartado “Data Source” como se muestra en la figura 45. (Foehn et al., 2019).

Figura 45: Enlace de la base de datos con el modelo.



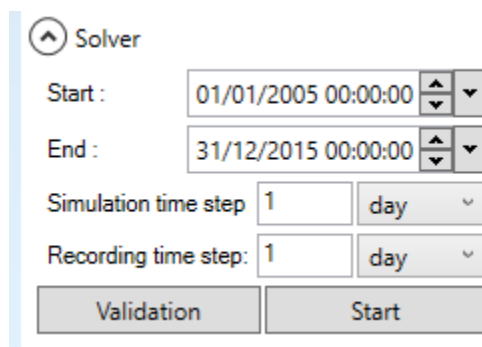
Fuente: RS Minerve.

En “Name” se selecciona el objeto a donde se enlazará la información, escogiendo el grupo en la opción “Group” y se especifica donde se encuentra la información a incorporar.(Foehn et al., 2019).

Luego, se define el tiempo de simulación en el menú “Solver” (figura 46) y se escoge el periodo de simulación de los resultados y la recopilación del mismo. (Foehn et al., 2019).

Se simula el caudal diario.

Figura 46: Menú solver de RS Minerve para correr el modelo.



The image shows a software interface titled "Solver" with a collapse icon. It contains the following fields and controls:

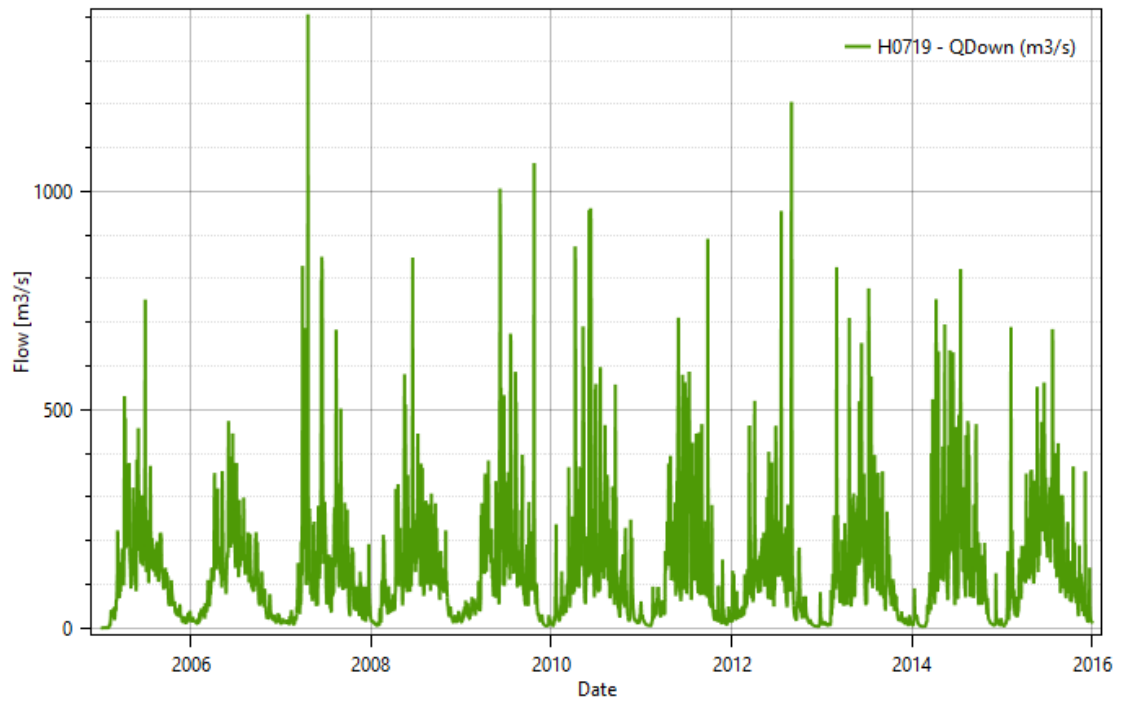
- Start:** A date-time field set to "01/01/2005 00:00:00" with up/down arrows.
- End:** A date-time field set to "31/12/2015 00:00:00" with up/down arrows.
- Simulation time step:** A numeric input field with "1" and a dropdown menu set to "day".
- Recording time step:** A numeric input field with "1" and a dropdown menu set to "day".
- Buttons:** Two buttons labeled "Validation" and "Start" are positioned at the bottom.

Fuente: RS Minerve.

Se comprueba que el modelo este correctamente estructurado con el botón “Validation”. Cuando RS Minerve confirma que no hay ninguna advertencia o error y que el modelo es correcto mediante una tabla de informe se puede ejecutar la modelación con el botón “Start” obteniendo los resultados de la modelación. (Foehn et al., 2019).

El caudal de resultado de la modelación hidrológica en el punto de salida del río Quijos en la estación H0719 Quijos DJ Oyacachi se representa en los siguientes gráficos. Resultado del caudal calculado mediante la ETP de forma automática en RS Minerve mediante la ecuación de Turc.

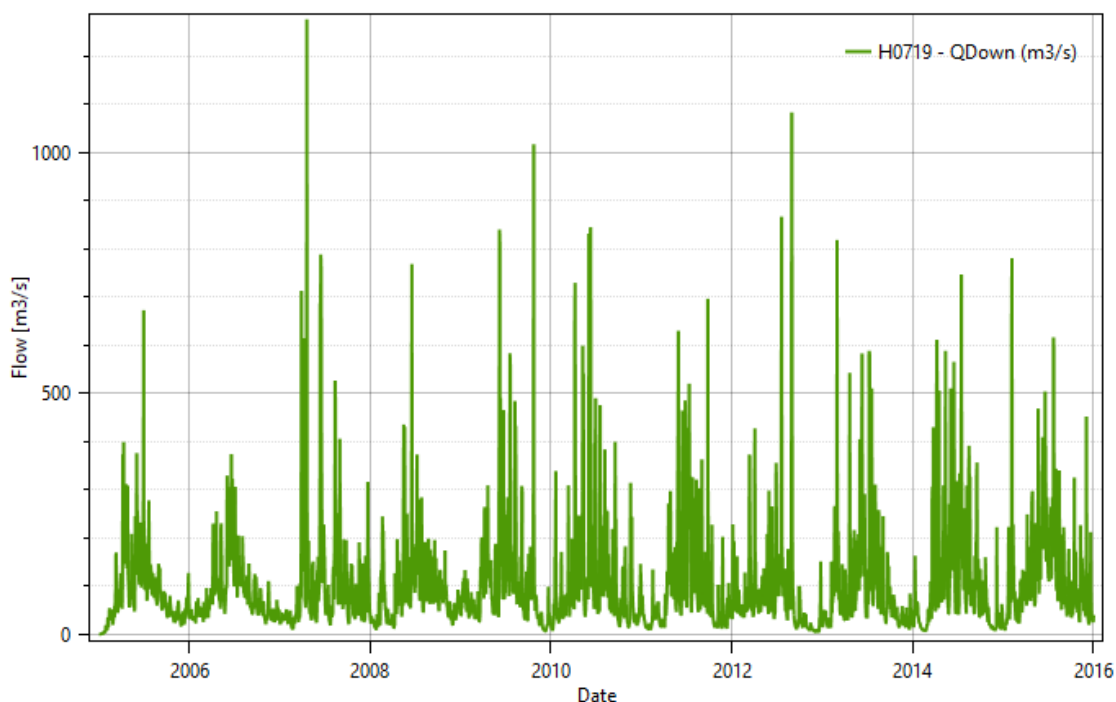
Gráfico 10: Resultado del Caudal de aforo de la cuenca Quijos con ETP calculada mediante RS Minerve.



Fuente: RS Minerve.

El resultado del caudal de la cuenca del río Quijos en la estación H0719, con la ETP calculada mediante Cropwat y posteriormente incorporada a la base de datos (Database) de RS Minerve, se observa en el siguiente gráfico.

Gráfico 11: Resultado del Caudal de aforo de la cuenca Quijos con ETP incorporada en la base de datos.



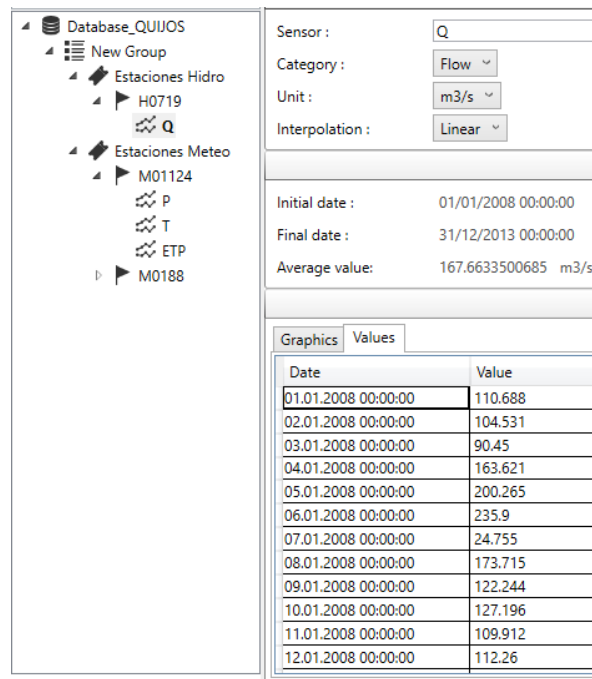
Fuente: RS Minerve.

3.3.3 Calibración de datos con la información de la estación hidrológica.

Adecuación del modelo hidrológico para la calibración en RS Minerve.

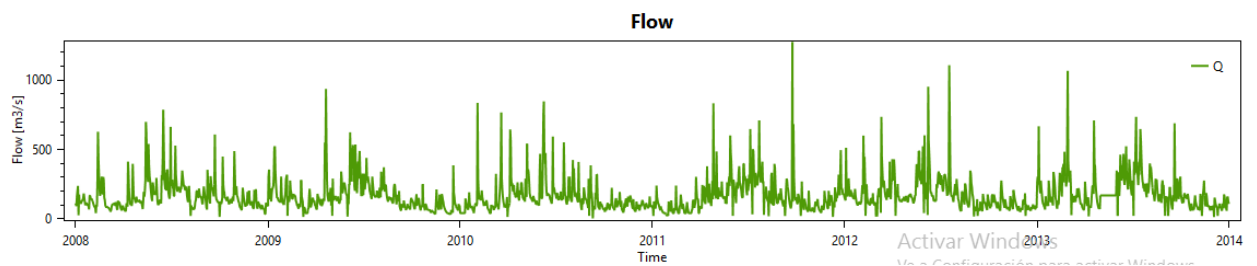
Para la adecuación a la calibración automática en RS Minerve, se incorporan los datos del caudal observado. En este caso se ha obtenido observaciones de la estación hidrológica H0719 Quijos DJ Oyacachi del INAMHI, H0718 Quijos en Baeza, H031 Cosanga AJ Quijos y H0733 Quijos AJ Borja. El periodo de calibración se escogió dentro de la serie más continua que empieza el 01 de enero del 2008 hasta el 31 de diciembre del 2013.

Figura 47: Incorporación de datos de caudales observados de la estación H0719 en RS Minerve.



Fuente: RS Minerve.

Figura 48: Datos de caudales observados de la estación H0719.



Fuente: RS Minerve.

Una vez que se han incorporado los datos de caudales el siguiente procedimiento se realiza en la modelación donde se incorpora los elementos “comparator” y “source”.

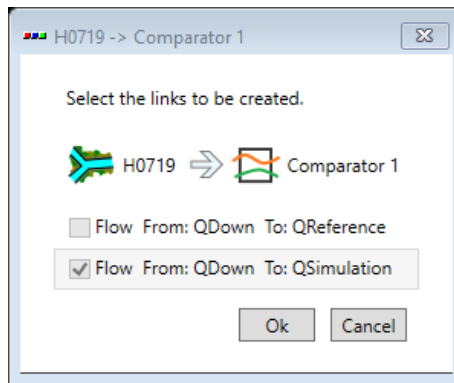
El elemento Comparator es un objeto que permite comparar resultados de una simulación con datos de referencia que provienen de otra fuente, como por ejemplo de la base de datos, ambos datos deben estar conectados al comparador para poder observar y comparar datos.(Foehn et al., 2019)

El elemento Source incorpora información desde la base de datos, se usa principalmente para definir series de tiempo de flujo ya sea para una turbina o bomba en el caso de usar para un estudio hidráulico, para el estudio hidrológico permite cargar datos de caudal o

flujo de referencia para la calibración, está unido al objeto comparador.(Foehn et al., 2019)

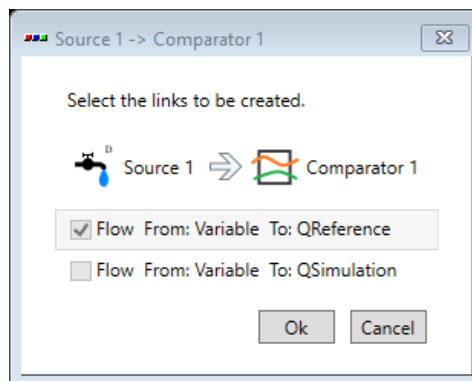
El punto de salida de la cuenca se une al objeto comparador, donde se vincula el caudal de simulación producto de la modelación hidrológica realizada.

Figura 49: Definición de la conexión entre el punto de salida y el objeto comparador.



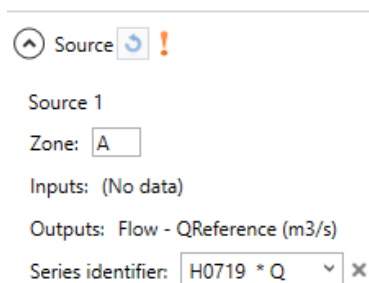
Fuente: RS Minerve.

Figura 50: Definición de la conexión entre el objeto source y el objeto comparador.



Fuente: RS Minerve.

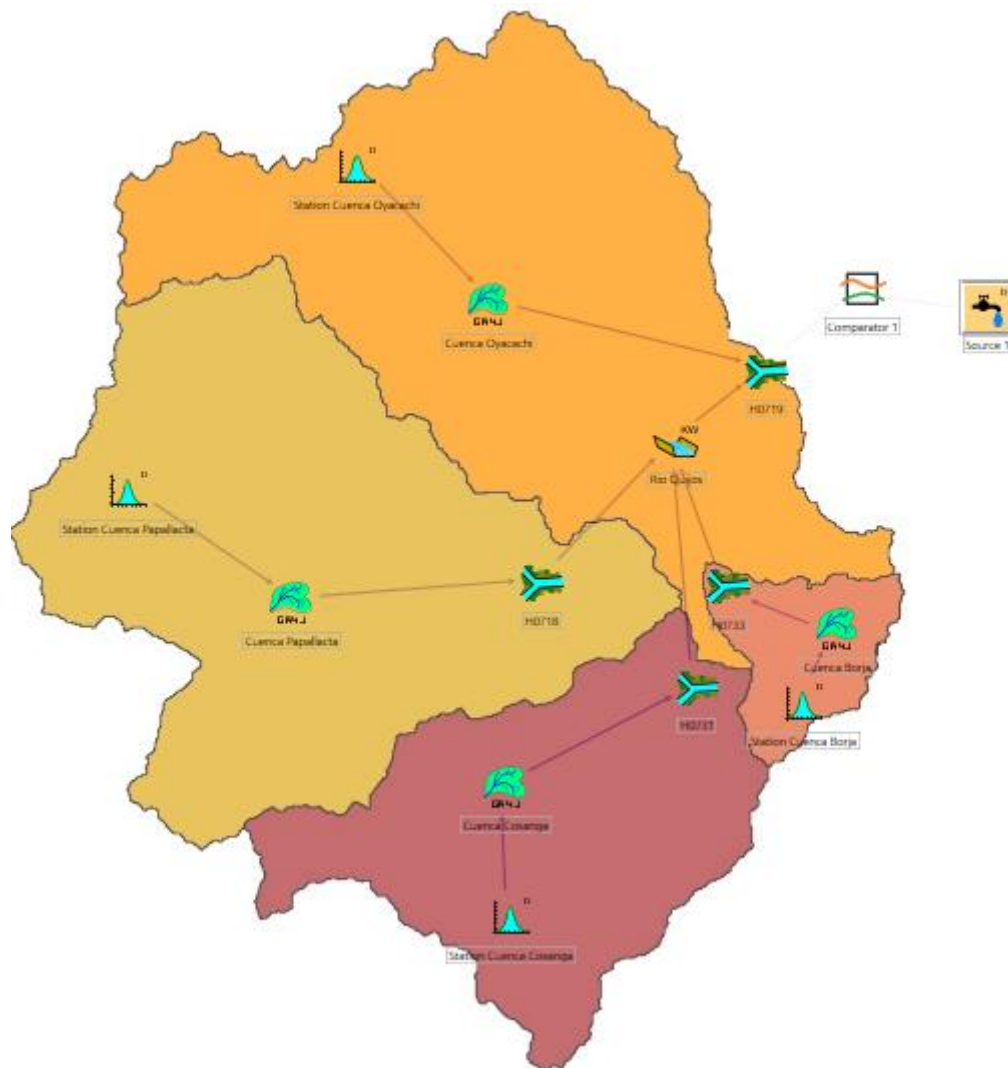
Figura 51: Serie del objeto "Source".



Fuente: RS Minerve.

Finalmente, el modelo hidrológico se completa y se puede dar inicio a la calibración.

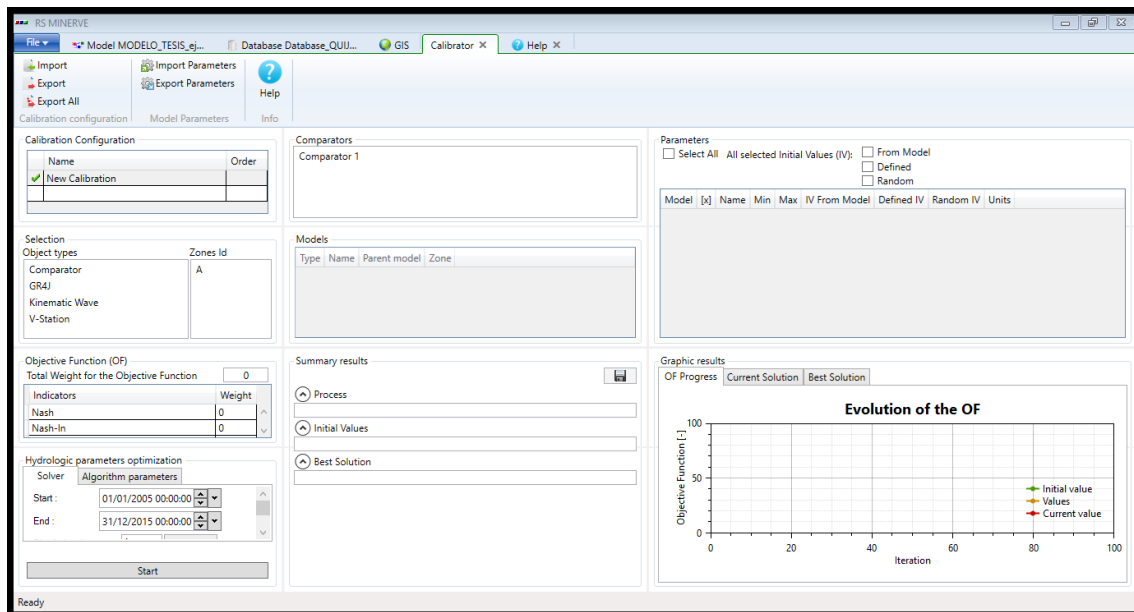
Figura 52: Incorporación de objetos “comparator” y “source” al modelo para la calibración.



Fuente: RS Minerve.

RS Minerve cuenta con la herramienta de calibración automática, la cual se puede observar la interface en la figura 53.

Figura 53: Captura de pantalla de Interface de la herramienta Calibrador de RS Minerve.



Fuente: RS Minerve.

Donde:

- La sección “Selection” se encuentran los modelos a calibrar a partir de los objetos que lo representan.
- La sección de “Parameters” se hallan los parámetros a calibrar y los valores máximos y mínimos de dichos parámetros.
- La sección “Comparator” muestra el comparador de referencia.
- La sección “Objective function (OF)” asigna el peso de prioridad de cada indicador que el usuario crea conveniente para el cálculo de la función objetivo.
- La sección “Hydrologic parameters optimization” es donde se elige el periodo de calibración y el algoritmo de optimización.
- La sección “Summary Results” se presenta el avance de los resultados de las iteraciones de la función objetivo.
- Y la sección “Graphic results” muestra de manera gráfica las iteraciones y avance de la función objetivo.

(Foehn et al., 2019).

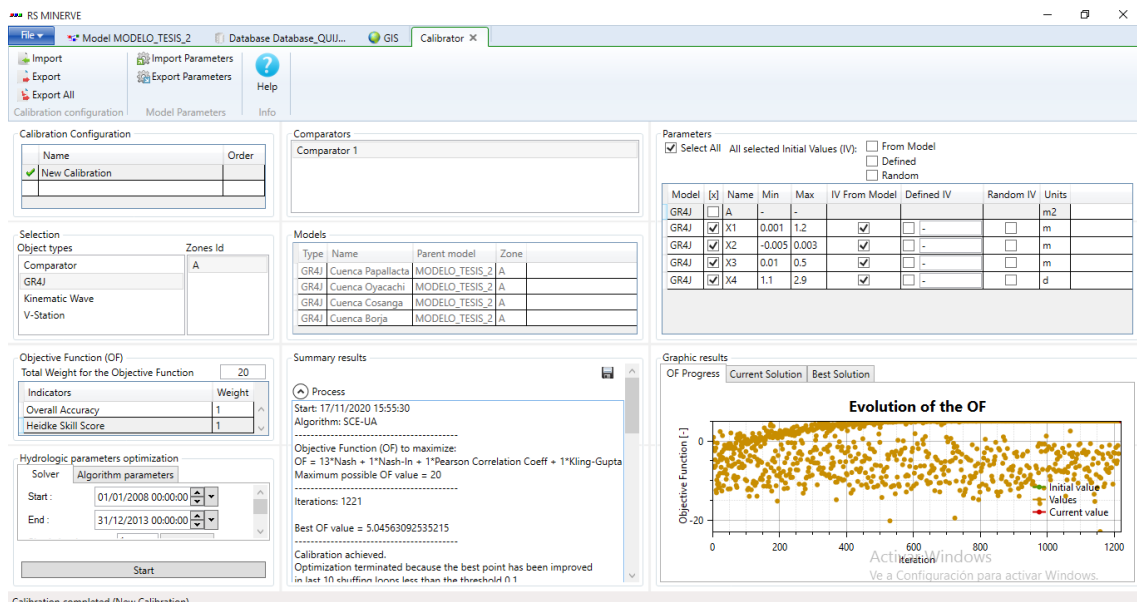
Procedimiento de la calibración.

Para éste proceso se ha analizado la calibración de cada año desde el 2008 al 2013 (periodo de calibración) con la función objetivo definida con los pesos o valores ideales que el manual técnico del software indica, como primera iteración de prueba-error. Para las siguientes iteraciones, una vez obtenido los valores de los coeficientes de la función objetivo de todos los años, se escoge la mejor respuesta y se procede a modificar los parámetros de la cuenca y se calibra en la herramienta de RS Minerve y así se va modificando hasta obtener un resultado aceptable. Este procedimiento de debe realizar de manera separada para cada modelo con distinto origen de ETP y se interpreta resultados. Finalmente se establece el algoritmo de optimización de los parámetros. Para eso se ha optado por utilizar el algoritmo SCE-UA que se encuentra incluido en la plataforma.(Foehn et al., 2019)

Calibración de la cuenca del río Quijos con ETP calculada mediante RS Minerve.

En este caso al ejecutar la calibración en la primera iteración se ha obtenido valores aceptables como “satisfactorios” en el indicador estadístico de Nash.

Figura 54: Captura de pantalla de la Calibración de la cuenca del río Quijos con ETP calculada mediante RS Minerve.



Fuente: RS Minerve.

Se tiene como resultados de esta calibración los valores de las tablas 28 y 29 de la misma manera se muestra el gráfico resultante de la calibración donde se observa el caudal

simulado (producto de la simulación) y el caudal de referencia (caudal observado de la estación H0719) en el gráfico 12.

Tabla 28: Valores resultantes de los parámetros de GR4J.

Parámetros GR4J	Valor calibrado
X1	0.001
X2	0.0026917
X3	0.2781994
X4	1.1000577

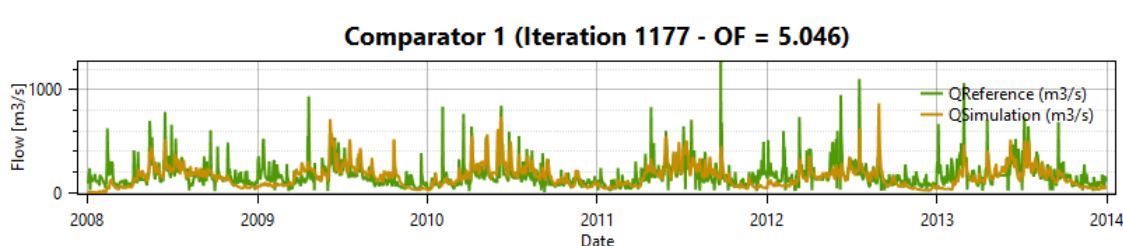
Fuente: Elaborado por el autor.

Tabla 29: Valores resultantes de los indicadores de la FO.

Indicadores	Resultado
Nash	0.23131859783
Nash-ln	1.11269459096
Pearson Correlation Coeff	0.58829267909
Kling-Gupta Efficiency	0.57917129707
Bias Score	0.99101903834
RRMSE	0.62143490965
Relative Volume Bias	-0.0865644057
Normalized Peak Error	-0.3171354393
Peirce Skill Score	0
Overall Accuracy	0.9927007299
Heidke Skill Score	0

Fuente: Elaborado por el autor.

Gráfico 12: Resultado de la calibración con ETP calculada mediante RS Minerve.



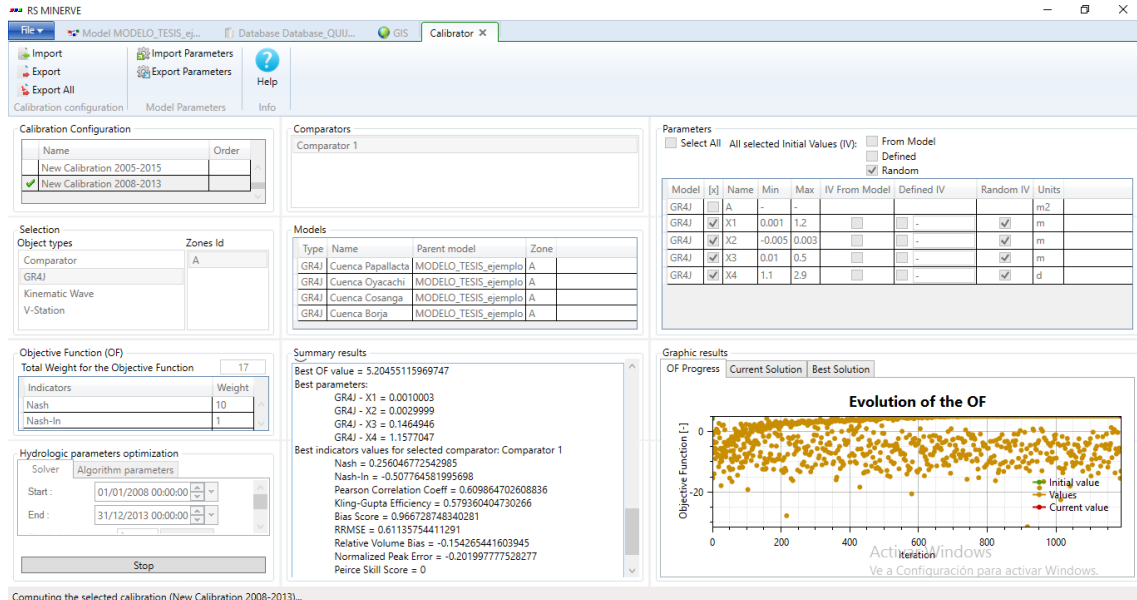
Fuente: RS Minerve.

Calibración de la cuenca del río Quijos con ETP calculada en Cropwat.

Una vez que se ha realizado la primera iteración se ha obtenido el año con mayor coeficiente de Nash, siendo el 2010 con un coeficiente de 0.426 que indica un valor “bueno”, se modifican los parámetros a calibrar para ejecutar en el periodo de calibración del 2008 al 2013, de la misma manera se da prioridad al coeficiente de Nash en la función

objetivo, de esa manera realizar simultáneamente varios ensayos de iteración en la herramienta de calibración automática, obteniendo los mejores resultados posibles para la calibración de los parámetros de la cuenca en análisis.

Figura 55: Captura de pantalla de la Calibración de la cuenca del río Quijos con ETP incorporada en la base de datos.



Fuente: RS Minerve.

Ya realizadas las iteraciones pertinentes los resultados de los parámetros calibrados de la cuenca, así como también el resultado de los indicadores de la calibración como se muestran en las tablas 30 y 31, de la misma manera se muestra el grafico resultante de la calibración donde se observa el caudal simulado (producto de la simulación) y el caudal de referencia (caudal observado de la estación H0719) en el gráfico 13.

Tabla 30: Valores resultantes de los parámetros de GR4J.

Parámetros GR4J	Valor calibrado
X1	0.001
X2	0.0029999
X3	0.1461478
X4	1.1584772

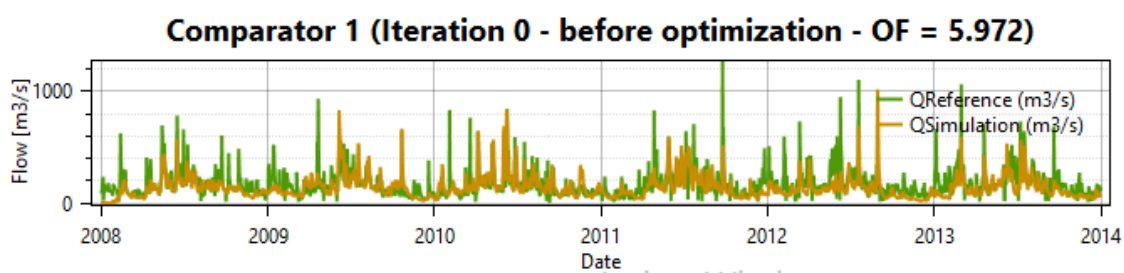
Fuente: Elaborado por el autor.

Tabla 31: Valores resultantes de los indicadores de la FO.

Indicadores	Resultado
Nash	0.25592675
Nash-In	-0.506724457
Pearson Correlation Coeff	0.609861251
Kling-Gupta Efficiency	0.579447677
Bias Score	0.966885792
RRMSE	0.611406857
Relative Volume Bias	-0.153957055
Normalized Peak Error	-0.201369517
Peirce Skill Score	0
Overall Accuracy	0.995894161
Heidke Skill Score	0

Fuente: Elaborado por el autor.

Gráfico 13: Resultado de la calibración con ETP calculada mediante Cropwat.



Fuente: RS Minerve.

Resultado de la calibración con ETP calculada mediante Cropwat.

Como se observa en las tablas 30 y 31 los resultados de cada uno de los análisis, se obtuvieron valores mayores a 0.2, siendo esto valores “Satisfactorios” como se indica en la tabla de valores referenciales del criterio de Nash- Sutcliffe en la tabla 24. Se esperaba obtener valores de indicadores más altos, sin embargo, tomando en cuenta la calidad de los datos no se puede descartar esta información. (Cabrera, 2009).

3.3.4 Validación de datos.

La validación de cada modelo hidrológico se realiza con los años faltantes del análisis, en este caso particular se obtuvo información de caudales observados del año 2014 al 2015 en el documento de investigación “Publicación de la información generada por las 35 estaciones hidrológicas automáticas” emitido por el INAMHI en el año 2016.

Validación de la cuenca del río Quijos con ETP calculada en RS Minerve.

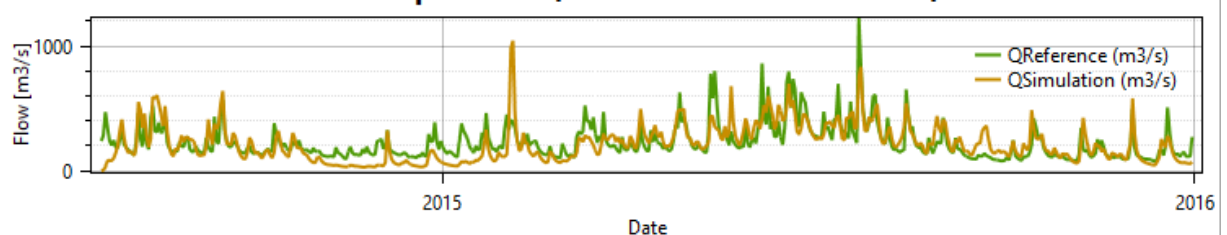
Al realizar el procedimiento de validación con los resultados de la calibración de los parámetros del elemento GR4J que representa las subcuencas, se han obtenido los siguientes resultados:

Tabla 32: Resultados finales de los indicadores de la validación.

Indicadores	Resultado
Nash	0.36334179
Nash-In	-0.6820852
Pearson Correlation Coeff	0.7092399
Kling-Gupta Efficiency	0.67681968
Bias Score	0.997058307
RRMSE	0.482878715
Relative Volume Bias	-0.051447022
Normalized Peak Error	-0.14894925
Peirce Skill Score	0
Overall Accuracy	-0.14894925
Heidke Skill Score	0

Fuente: Elaborado por el autor.

Gráfico 14: Resultado final de la validación con ETP calculada mediante RS Minerve.



Fuente: RS Minerve.

Validación de la cuenca del río Quijos con ETP calculada en Cropwat.

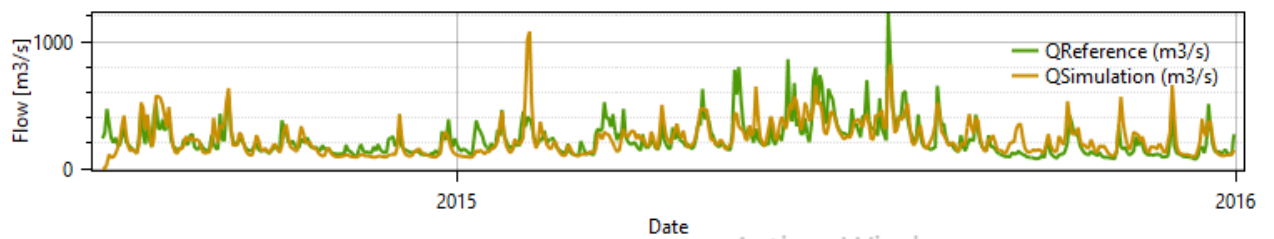
Al realizar el procedimiento de validación con los resultados de la calibración de los parámetros del elemento GR4J que representa las subcuencas, se han obtenido los siguientes resultados en la tabla 33 y el gráfico 15.

Tabla 33: Resultados finales de los indicadores de la validación.

Indicadores	Resultado
Nash	0.422551903
Nash-In	-0.172570016
Pearson Correlation Coeff	0.7028200665
Kling-Gupta Efficiency	0.697065932
Bias Score	0.999481401
RRMSE	0.459876660
Relative Volume Bias	0.022772762
Normalized Peak Error	-0.1193873753
Peirce Skill Score	0
Overall Accuracy	0.998116760
Heidke Skill Score	0

Fuente: Elaborado por el autor.

Gráfico 15: Resultado final de la validación con ETP calculada mediante Cropwat



Fuente: RS Minerve.

4 Capítulo IV: Análisis de resultados.

4.1 Determinación e interpretación de resultados.

Análisis de la información ETP.

La ETP media mensual calculada mediante Cropwat 8.0 en la estación M0188 Papallacta es de 2.29 mm/día y en la estación M1124 Sierra Azul es de 2.84 mm/día, mientras que en RS Minerve su obtuvo un valor promedio de 1.81 mm/día. Sin embargo, el comportamiento de ambos resultados de ETP fue satisfactorio ya que en un principio el modelo generado con ETP proveniente de la base de datos originada en Cropwat 8.0 obtuvo coeficientes insatisfactorios por lo que se obtuvo por realizar un proceso de iteración sucesivas con la calibración, obteniendo a la final un resultado satisfactorio, mientras que el modelo hidrológico que posee ETP calculada por RS Minerve obtuvo resultados satisfactorios a la primera iteración de calibración por lo que no fue necesario realizar un proceso iterativo

Análisis en el punto de aforo de la cuenca.

El punto de aforo de la cuenca del río Quijos se ubica la estación hidrológica H0719 DJ Quijos Oyacachi, donde se ha obtenido los siguientes resultados mediante la simulación y modelación hidrológica a partir del software RS Minerve. A su vez se diferenciaron dos modelaciones, la primera calculando la evapotranspiración de manera automática mediante el mismo software de modelación y el segundo modelo obtenido mediante la incorporación de la evapotranspiración en la base de datos y calculada usando el programa Cropwat 8.0, con el fin de comparar datos, procedimientos y resultados, y de esa manera obtener resultados más confiables.

Caudal de aforo de la cuenca Quijos con ETP calculada mediante RS Minerve.

El resultado que se ha obtenido a través de la modelación hidrológica del río Quijos en el punto de salida de la cuenca tomada en la estación H0719 del INAMHI es un caudal que presenta crecidas en los mismos meses que el clima es lluvioso, siendo estos meses de abril a agosto, meses en los cuales se registra el máximo caudal de 1405.476 m³/s en el año 2007 mes de abril, y la crecida del caudal disminuye a partir de los meses de septiembre a febrero/marzo, la información del clima se ha obtenido del PDOT del cantón Quijos.

Caudal de aforo de la cuenca Quijos con ETP incorporada en la base de datos.

El resultado del caudal de aforo que ingresa a la estación H0719 mediante la simulación hidrológica tiene como resultado un caudal máximo de 1276.407 m³/s. El caudal del río Quijos presenta crecidas en los meses de abril a agosto, paralelo a la estación o época lluviosa de la cuenca en análisis como se señala en el PDOT del cantón Quijos, así como también el caudal disminuye su valor en los meses restantes que corresponden a los meses secos siendo esta época de septiembre a febrero. Resultados que son paralelos a la otra modelación.

Análisis de la calibración.

Tanto como para el modelo calculado con ETP en RS Minerve e incorporado en la base de datos, se ha obtenido similares respuestas en los indicadores estadísticos de eficiencia y al compartir ambos la misma función objetivo para el cálculo de la calibración con una prioridad de peso en el valor de Nash se consiguió valores mayores a 0.2, siendo un valor “Satisfactorio” con lo cual se procedió a realizar la validación de cada modelo con cada uno de sus parámetros calibrados respectivamente.

Los demás indicadores como son Pearson, KGE, BS, RRMSE, RVB, NPE, PSS y OA tienden en su gran mayoría (en ambas modelaciones) a acercarse a su valor ideal.

Análisis de validación.

Una vez que los resultados de la calibración para cada modelo sean aceptables, se procede a realizar la validación. Como se pudo constatar la calibración en ambos modelos son satisfactorios por lo que se puede realizar la validación.

Tanto para el modelo con ETP calculada en RS Minerve, como el modelo con ETP calculada mediante Cropwat se ha obtenido un aumento significativo en el coeficiente de Nash, que es de 0.363 y 0.422 respectivamente. Con este último resultado se puede argumentar que el modelo tiene una aceptación según la tabla 24 de “Bueno”. Cabe recalcar que, para los demás indicadores, RS Minerve calcula la mejor respuesta en base a todos ellos, por lo que también en la validación se evidencia un acercamiento al valor ideal que cada uno de estos coeficientes debe poseer.

No obstante, se puede señalar como los gráficos de resultados de la validación del caudal de referencia (caudales observados) y el caudal de simulación (obtenido mediante la modelación) hay una adecuada aproximación.

4.2 Escenarios de comportamiento climático.

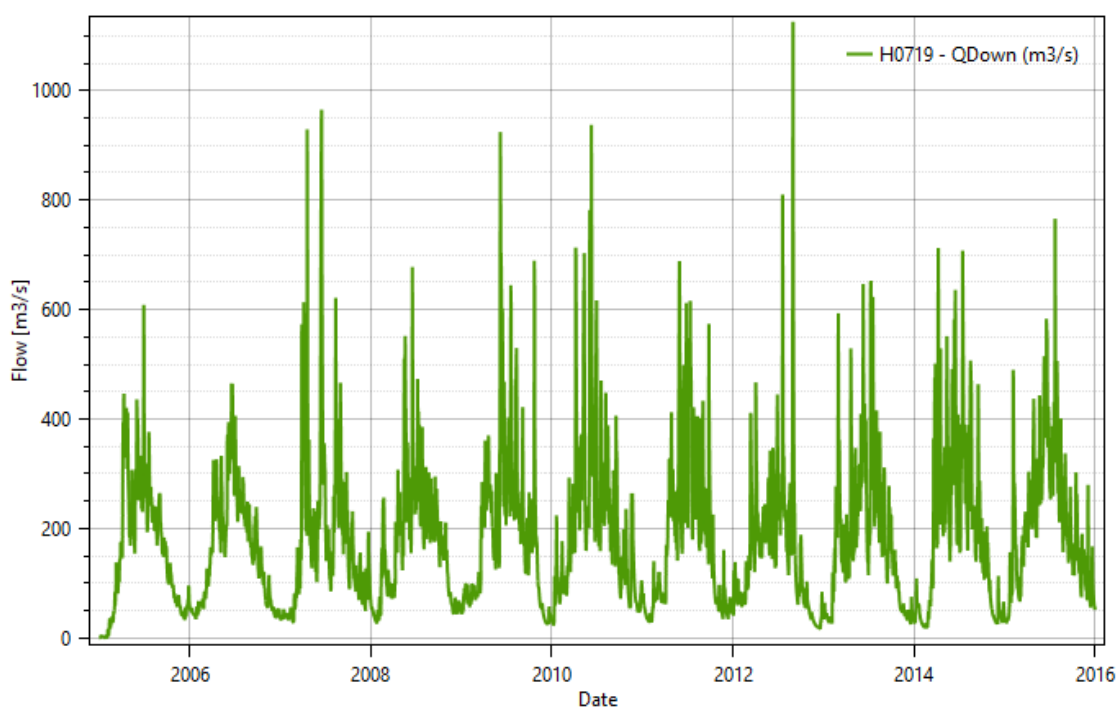
Para el análisis hídrico de una cuenca, se observa la mudanza del comportamiento normal de las condiciones meteorológicas históricas aplicando varios escenarios que estiman posibles eventos extremos. (C. Andrade, 2020).

La construcción de los escenarios se basa en los estudios efectuados por las instituciones que conforman el Comité Nacional Erfen⁴. Dichos estudios indican que en el Ecuador continúan condiciones del fenómeno "El Niño" débil reflejadas en el incremento de la temperatura aproximadamente de 1°C y que los pronósticos de precipitaciones en el 2019 son de valores normales en la Amazonía. (INOCAR, 2019).

4.2.1 Escenario lluvioso.

El escenario lluvioso considera el aumento de la precipitación de la cuenca en un 20% y el aumento de la temperatura en 1°C, aumentado a su vez el valor de la evapotranspiración. El gráfico muestra el caudal resultante del escenario lluvioso en el punto de salida de la cuenca del río Quijos en un periodo de 10 años.

Gráfico 16: Escenario lluvioso.



Elaborado por el autor

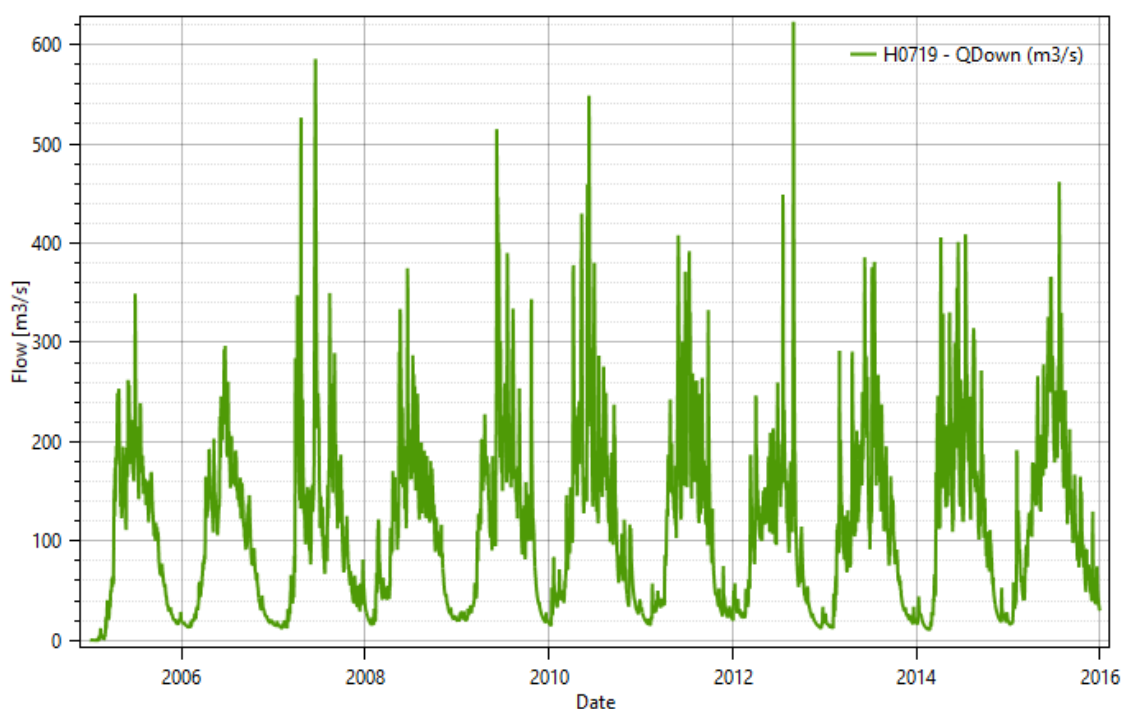
Fuente: RS Minerve

⁴ Estudio Regional del Fenómeno de El Niño. (INOCAR, 2019).

4.2.2 Escenario seco.

Para el escenario seco se considera la disminución de la precipitación de la cuenca en un 20% y la temperatura en 1°C se mantiene igual que el escenario anterior, cambiando automáticamente el valor de la evapotranspiración y el caudal de aforo. El gráfico muestra el caudal resultante del escenario seco en el punto de salida de la cuenca del río Quijos en un periodo de 10 años.

Gráfico 17: Escenario seco.



Elaborado por el autor

Fuente: RS Minerve

4.2.3 Comparación de escenarios.

La tabla 34 muestra los resultados de caudales de aforo en la estación H0719 obtenidos de los escenarios en comparación con las condiciones normales.

Tabla 34: Tabla de comparación de escenarios.

Caudal de aforo en la estación H0719			
Año	Condiciones Normales	Escenario lluvioso	Escenario seco
2005	131.34	273.36	95.38
2006	135.29	270.26	98.73
2007	155.60	293.48	113.28
2008	146.38	281.70	107.16
2009	165.35	303.75	121.90
2010	176.00	316.65	128.94
2011	154.83	283.70	113.60
2012	134.71	264.13	97.65
2013	154.23	290.03	114.21
2014	165.01	300.22	124.06
2015	182.09	327.10	134.01

Elaborado por el autor

La tabla 34 se presenta los resultados de caudales de aforo de la cuenca Quijos en la estación H0719 mediante la modelación en RS Minerve para un periodo de 10 años, con las mismas condiciones y parámetros en cada escenario.

Al comparar los resultados de cada escenario con el resultado en condiciones meteorológicas normales tenemos que:

- Al aumentar la temperatura 1°C y precipitación en un 20% el caudal de aforo directo cada año se aumenta en un rango de 79 a 100%. El caudal máximo observado dentro del periodo de tiempo evaluado es de 1730.92 m³/s en un día.
- Y la consecuencia en la disminución de las precipitaciones en un 20% genera que el caudal de aforo disminuya alrededor de entre un 24 a 27 %. El caudal máximo observado dentro del periodo en estudio es 622.944 m³/s en un día.

5 Capítulo V: Conclusiones y recomendaciones.

5.1 Conclusiones.

Como resultado se ha obtenido los hidrogramas del caudal de aforo en la estación hidrológica del INAMHI H0719 DJ QUIJOS OYACACHI calculada mediante el software RS Minerve, concluyendo que:

La principal ventaja de RS Minerve es que es un software de uso libre, además su interfaz es amigable y didáctica para el usuario, cuenta con sistema de información geográfica (herramienta GIS) incorporada al programa, con herramientas que permiten realizar calibraciones de los modelos de manera automática, permite la creación de base de datos meteorológicos e hidrológicos y brinda una gran cantidad de modelos hidrológicos para la aplicación en diferentes casos de estudio. El programa además de ser implementado en estudios hidrológicos también posee herramientas hidráulicas.

RS Minerve posee un sistema operacional que permite la pronosticación de eventos hidrológicos para tener un seguimiento de cualquier situación en el área de estudio por expertos. El sistema de previsión hidro-meteorológica MINERVE proporciona una herramienta útil y eficiente para la previsión de venidas a partir de la automatización de simulaciones totalmente personalizadas.

La caracterización de la cuenca hidrográfica del río Quijos es exorreica que tiene un área de 2453 km² y un perímetro de 325 km y una longitud del cauce del río principal de 36 km aproximadamente. El factor de compacidad (K_c) tiene un valor de 1.83 y un factor de forma (K_f) de 0.8, que indica que es una cuenca hidrográfica irregular con forma oval a rectangular oblonga y con un índice K_f relativamente bajo, esto significa que la cuenca puede no ser susceptible a inundaciones o con menos probabilidad de crecientes en comparación a otras cuencas del mismo tamaño.

Para la modelación hidrológica de la cuenca del Río Quijos se realizó la comparación de ETP calculada mediante el software Cropwat 8.0 (gráficos 6 y 9) y RS Minerve muestra en los resultados del caudal de aforo una gran semejanza y paralelismo. Cabe destacar que Cropwat 8.0 entrega resultados mensuales mientras que RS Minerve calcula valores diarios por lo que se puede despreciar cuando se trata de valores promedios, no obstante, el comportamiento al realizar la calibración y validación de ambos modelos fue

satisfactorio al momento de modelar la cuenca. El modelo con origen de ETP en RS Minerve obtuvo resultados buenos más rápidos por lo que se concluye que el software brinda una herramienta capaz de calcular evapotranspiración y es de gran ayuda ya que en muchas zonas del Ecuador se percibe la inexistencia de una serie de datos de evapotranspiración que pueda ser usada (como se observó en este trabajo), a lo que se le adjunta una ventaja más al software.

El modelo hidrológico GR4J es bueno para realizar simulaciones de caudales cuando se desea realizar un trabajo y análisis rápido, ya que a diferencia de los demás modelos éste requiere menos cantidad de parámetros, y puede ser utilizado en cuencas hidrográficas sin un profundo estudio en comparación a otros modelos que RS Minerve presenta. El modelo GR4J al tener un bajo número de parámetros (tabla 7) permite una calibración más liviana, como resultado el tiempo de calibración es relativamente menor en comparación a otros modelos hidrológicos, este tiempo también depende del trabajo que realiza el software para arrojar el mejor resultado. Aproximadamente se consiguió más de 1000 iteraciones por cada análisis que se realizó en un periodo de tiempo de 5 años. La calibración de cada análisis se demoró de 20 a 40 minutos. De los hidrogramas resultantes de la modelación de la cuenca del río Quijos se confirma que la época lluviosa está presente en los meses de abril y agosto generando una mayor escorrentía en la cuenca, mientras que los meses secos, que va desde septiembre a febrero, se identifica una disminución en los picos diarios de la escorrentía del hidrograma, el comportamiento es el mismo en cada año.

Una vez ya obtenidos resultados de los hidrogramas de caudal satisfactorios en la calibración, ambos modelos fueron sometidos a la validación que arroja resultados mejores en los indicadores estadísticos, tomando como prioridad el coeficiente de Nash que indica una validación “Buena” en ambas modelaciones (tablas de resultados 32 y 33). El resultado final que es la obtención del caudal de ingreso a la estación hidrológica H0719 (punto de salida o aforo de la cuenca) dio como resultado una validación que simula de una manera muy parecida al caudal original de datos observados (véase los gráficos 14 y 15), puede considerarse el análisis de ciertos valores puntuales para corroborar la compatibilidad de la validación como el pico máximo se presenta en el mes de julio del 2015 tanto en los datos observados como en los datos validados.

En conclusión, RS Minerve es un software que permite la obtención de caudales de aforo resultante de los procesos hidrometeorológicos, de manera eficiente con este propósito, teniendo en cuenta que atrás de la simulación de cada modelación hidrológica debe ser acompañado de un exhaustivo estudio de la zona en análisis para obtener buenos resultados que permitan la toma de decisiones y predicciones de caudales y eventos hidrológicos. Y para el buen uso del programa con el objetivo de tener una modelación hidrológica correcta capaz de ser empleada como procedimiento para replicas en diferentes zonas de estudio.

5.2 Recomendaciones.

Para realizar un trabajo de modelación debe existir un previo estudio que ayude a comprender los fenómenos climáticos que ocurre en la zona de estudio, para ello se recomienda la previa investigación, también un buen conocimiento de los alcances que RS MINERVE brinda como plataforma de estudio hidrológico.

Para realizar la caracterización de una cuenca se recomienda obtener la mayor cantidad de información de manera que se pueda reconocer los factores que deben intervenir en el estudio para escoger el objeto o modelo hidrológico de RS Minerve más adecuado para la zona de estudio.

El Ecuador al poseer poca información meteorológica e hidrológica, se recomienda a los futuros investigadores realizar investigaciones comparativas con fuente de información meteorológica (precipitación, temperatura, ETP, entre otras) para así obtener mayor fuente de datos que sean confiables y aplicables en nuestro país como puede ser mediante información satelital mundial, que es fácil de obtener vía internet.

Se recomienda realizar trabajos comparativos usando otros modelos que la plataforma RS MINERVE posee de esa manera saber si existen otros modelos que con más parámetros puedan optimizar el resultado del caudal a obtener.

Al contar RS MINERVE con una sección de hidráulica, se recomienda realizar trabajos investigativos usando dichas herramientas hidráulicas que permitan conocer el alcance que estas herramientas que pueden ser utilizadas para el beneficio investigativo en el país.

6 Bibliografía.

- Aguirre, M., Ruiz, R., & Torres, H. (2005). *Delimitación y Codificación de Cuencas Hidrográficas del Perú*. 36.
- Aliaga, I. (2017). "Modelación hidrológica de la cuenca del río Huallaga, aguas arriba del punto de control Santa Lorenza".
- Andrade, A. (2016). *Análisis De La Influencia De La Geodinámica Y Los Impactos Antrópicos En La Geomorfología Fluvial Del Río Coca. Caso De Estudio: Impactos Fluviales Del Proyecto Coca Codo Sinclair – Phccs*. 1–176.
https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/15206?fbclid=IwAR03DOKN8DkxektgeQ4alHpB-Ehk9fgay3IrrLmimN7yA7C0QSYIJQB_m3c
- Andrade, C. (2020). *BALANCE HÍDRICO DE LA CUENCA DEL RÍO GRANOBLES LOCALIZADA EN LA DEMARCACIÓN HÍDRICA DEL ESMERALDAS, MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL PROGRAMA HYDROBID*. PUCE.
- Cabrera, J. (2009). Calibración de Modelos Hidrológicos. *Imefen.Uni.Edu.Pe*, 1, 1–7.
http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_2.pdf
- Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1994). Hidrología aplicada. In *Hidrología aplicada* (p. 575 pp). <http://bases.bireme.br/cgi-bin/wxislind.exe/iah/online/?IsisScript=iah/iah.xis&src=google&base=REPIDISC&lang=p&nextAction=lnk&exprSearch=158911&indexSearch=ID%5Cnhttp://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=BINAI.xis&method=post&formato=2&cantidad=>
- Domínguez, E., Angarita, H., & Rivera, H. (2010). The Feasibility of daily, weekly and ten day water-level forecasting in Colombia. *Ingeniería e Investigación*, 30(2), 178–187.
- Foehn, A., Hernandez, J. G., Roquier, B., Sanmartin, J. F., Arquiola, J. P., & Cesare, G. De. (2019). *RS MINERVE v2.14 - User Manual*. October, 1–117.

- García Hernández, J., Foehn, A., Fluixá-Sanmartín, J., Roquier, B., Brauchli, T., Paredes Arquiola, J., & De Cesare, G. (2020). *RS MINERVE RS MINERVE - Technical Manual*. April.
- Gonçalves, H. C., Mercante, M. A., & Santos, E. T. (2011). Ciclo hidrológico. *Brazilian Journal of Biology*, 71(1 SUPPL.), 241–253.
- González M., C. (1989). Simulación hidrológica. *Ingeniería e Investigación*, 19, 63–70.
- Gorii, I., Garcia-AIonso, A., & Saura Calixto, F. (1997). *MORFOMETRIA DE CUENCAS*. 21(3), 295–316.
- Horna, L. (2016). *Evaluación Hidrometeorológica y de Sedimentos en la Cuenca del Río Coca en la Zona de Influencia del Proyecto Coca Codo Sinclair (Tesis de pregrado en Ingeniería Civil)*. 145.
<http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/15064>
- INAMHI. (2013). *Instituto nacional de meteorología e hidrológia*.
- Iparraguirre, D., & Bramont, L. manuel. (2015). GENERACIÓN DE HIDROGRAMAS DE LA SUBCUENCA CHOSICA EMPLEANDO LA PLATAFORMA DE MODELAMIENTO RS MINERVE. *Pontificia Universidad Católica Del Perú*, 1, 113.
http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/6097/ACOSTA_CARLOS_DISEÑO_MAQUINA_REBANADORA.pdf?sequence=1
- Jurado, J., Ehlers, F., De Queiroz, J., Enríquez, A., Aguirre Núñez, M., Rosas, L., Miguel, M., & Tintaya, Q. (2009). *SECRETARIA NACIONAL DEL AGUA DEL ECUADOR SECRETARIA GENERAL DE LA COMUNIDAD ANDINA UNIÓN INTERNACIONAL PARA LA CONSERVACIÓN DE LA NATURALEZA Secretaria Nacional del Agua del Ecuador Oficina Regional para América del Sur de la UICN*. 60. <http://app.sni.gob.ec/sni->

link/sni/PORTAL_SNI/PORTAL/IG/7_delimitacion_codificacion_metodologia_pf
afstetter.pdf

- Mendoza, P. (2010). *Pronóstico de caudales de crecida mediante un modelo hidrológico distribuido y la asimilación de datos observados*. *March*, 218.
http://repositorio.uchile.cl/tesis/uchile/2010/cf-mendoza_pz/pdfAmont/cf-mendoza_pz.pdf
- Monsalve, G. (2008). *Hidrología en la Ingeniería* (p. 382).
- Ordoñez, J. (2011). *¿ QUÉ ES CUENCA HIDRÓLOGICA ?*
- Palma, A. (2016). La Cuenca hidrográfica. *Anales de Ingeniería*, 935, 38.
- PDOT del cantón Quijos. (2013). *Plan de desarrollo y Ordenamiento Territorial*.
- Rivera, H., González, H., Martínez, Ó., Domínguez, E., Romero, H., Fajardo, M., Eduardo, Z., González, Y., & Carvajal, M. (2008). *Protocolos para la emisión de pronósticos hidrológicos* (Imprenta N).
- Sanchez, J. (1974). *Modelos matematicos en hidrologia*.
- SILVEIRA, 1997 (TUCCI cap. 2). (n.d.).
- Tellez, A. F. (2016). *Modelación Hidrología del Sistema de Eplotación Gállego-Cinca de la Confederación Hidrográfica del Ebro mediante el modelo de precipitación-escorrentoa HBV*. 1–31.
- Torres, J. E., & Aragón, J. A. (2018). *Investigacion En Hidrologia General, Istopica Y Aplicada*.

7 Anexos.

Anexo 1: Ubicación de la Cuenca del río Quijos e información general.

