

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE HONDURAS
INSTITUTO HONDUREÑO DE CIENCIAS DE LA TIERRA
MAESTRÍA EN RECURSOS HÍDRICOS ORIENTACIÓN HIDROGEOLOGÍA**



TESIS

***“ESTIMACIÓN DE LA IMPORTANCIA DE LAS APORTACIONES
SUBTERRANEAS AL FLUJO BASE EN RÍOS DE MONTAÑA”***

PRESENTA: José Max Ayala Rojas

**PREVIA OPCIÓN AL GRADO DE MASTER EN:
RECURSOS HÍDRICOS ORIENTACIÓN HIDROGEOLOGÍA**

ASESORES:

Gerson Urtecho

Irma Ayer Rivera

TEGUCIGALPA, MDC.

HONDURAS, C.A.

Junio, 2019

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE HONDURAS
INSTITUTO HONDUREÑO DE CIENCIAS DE LA TIERRA
MAESTRÍA EN RECURSOS HÍDRICOS ORIENTACIÓN HIDROGEOLOGÍA
Ciudad Universitaria, Tegucigalpa, Honduras.**



AUTORIDADES UNIVERSITARIAS:

DOCTOR: FRANCISCO HERRERA

RECTOR INTERINO

ABOGADA: ENMA VIRGINIA RIVERA MEJIA

SECRETARIA GENERAL

DOCTOR: ARMANDO EUSEDA

DIRECTOR DE POSTGRADOS

MASTER: MANUEL RODRIGUEZ

COORDINADOR DE LA MAESTRÍA

JUNIO, 2019

AGRADECIMIENTOS

A mi familia y personas que me apoyaron

De la lluvia vienen los ríos que dan vida y forman el mundo.

RESUMEN

Este estudio aborda el análisis del caudal base y la integración en un modelo hidrológico semi-distribuido a escala de subcuenca. La consideración de estas aportaciones subterráneas tiene una gran importancia en la valoración completa de los recursos hídricos disponibles a lo largo del año, pues constituyen, con frecuencia, la única contribución que se mantiene durante periodos largos ausentes de precipitación, tomando especial relevancia en el periodo estiaje.

En este sentido, se valoró diferentes aproximaciones a lo largo del desarrollo de esta investigación encaminada principalmente al modelado de las aportaciones subterráneas a escala de subcuenca en el río Jicatuyo, cuya cuenca comprende la vertiente suroeste del río Ulua.

En primer lugar, se evaluaron los métodos tradicionales de separación del aporte subterráneo desde un valor puntual en la curva de duración de frecuencia hasta métodos gráficos de separación a escala de evento; seguidamente se ha efectuado otro estudio indirecto de la relación río-acuífero en la subcuenca a partir del análisis de recesión de caudales en puntos de aforo concreto obteniendo una curva de recesión maestra que ayuda a cuantificar el decaimiento del caudal de un río en la época de estiaje.

En segundo lugar, se emplearon algoritmos de filtrado para separar el aporte subterráneo de superficial a series continuas de información de caudal diario, permitiendo generar una continua de la variación de la descarga del acuífero a la corriente total del río, aplicando para ello el método de filtrado recursivo de uno y dos parámetros. Metodología que, sin embargo, tiene sus limitaciones al ser relaciones empíricas y la necesidad de una serie consistente, es decir sin vacíos en su información.

Finalmente, siendo este el objetivo de la investigación, la implementación de un modelo hidrológico conceptual, es decir, un modelo que parta de parámetros físicos que interviene en el proceso lluvia - escorrentía, para lo cual se empleó el modelo hidrológico HBV. El modelo fue calibrado utilizando información hidrometeorológica registrados en la subcuenca durante 1971- 2006 en el caso de la precipitación y 2001 -2006 en los registros de caudal. Lo que llevo a observar que en la cuenca el aporte subterráneo en la subcuenca se encuentra en valores medios de un 30% del caudal total del río. Valor que coincide otros estudios que se han realizado en cuencas de montaña.

ABREVIATURAS.

°C	Grados centígrados.
CDF	curva de duración de frecuencia
CENAOS	Centro de estudios atmosféricos y oceánicos
COPECO	Comité Permanente de Contingencia
CRM	Curva de Recesión Maestra
DGRH	Dirección general de Recursos Hídricos
E	Evaporación
ENEE	Empresa nacional de energía eléctrica
ENOS	El Niño-Oscilación del Sur
<i>ETP</i>	Evapotranspiración Potencial
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
FHIS	Fondo Hondureño de Inversión Social
HBV/IHMS	Sistema de modelación hidrología integrada
HMP	Hidrometeorológica principal
ICB	Índice de Caudal Base
IHCIT	Instituto Hondureño de Ciencias de la Tierra
m.m	milímetros
m.s.n.m.	Metros Sobre el Nivel del Mar
m ³ s ⁻¹	metros cúbicos por segundo
MiAmbiente	Secretaría de Energía, Recursos Naturales, Ambiente y Minas
MMC	Millones de Metros Cúbicos
OMM	Organización Meteorológica mundial
PG	Precipitación incidente
PHCA	Programa hidrometeorológico Centroamericano.
PMDN	Programa Mitigación de Desastres Naturales
SERNA	Secretaría de recursos naturales y ambiente
SINIT	Sistema Nacional de Información Ambiental
SMHI	Instituto Meteorológico e Hidrológico Sueco
SMN	Servicio meteorológico Nacional
SPI	Precipitación estandarizada
Td	rango de temperatura
Tm	Temperatura media
UNAH	Universidad Nacional Autónoma de Honduras
USGS	El Servicio Geológico de los Estados Unidos

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	3
RESUMEN	4
ABREVIATURAS.....	5
1. INTRODUCCIÓN.....	11
2. CAPITULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	
12	
2.1 Situación Problemática	12
2.2. Formulación del problema de investigación	12
2.3. Preguntas de Investigación	12
2.4. Objetivos de la investigación	13
2.5. <i>Objetivo general:</i>	13
2.6. <i>Objetivos específicos:</i>	13
2.7. Justificación de la Investigación	13
2.8. Hipótesis de la Investigación	15
3. CAPITULO II: MARCO TEÓRICO	16
3.1. El ciclo hidrológico.....	16
3.2. Ciclo hidrológico como un sistema.....	17
3.3. Estimación de las aportaciones subterráneas	24
3.3.1. Análisis mediante curva de duración de frecuencia (CDF)	24
3.3.2. Técnicas de separación de caudal base en series temporales.....	25
3.3.3. Métodos gráficos de separación.....	26
3.3.4. Separación a escala de evento.....	26
3.3.5. Curva de recesión maestra (CRM).....	28
3.3.6. Método del filtro recursivo digital	29
3.3.7. Otros métodos	29
3.4. Separación de caudales base mediante modelos hidrológicos	30
3.4.1. El código Sistema de modelación hidrología integrada (HBV/IHMS)	31
4. CAPITULO III: DESCRIPCIÓN DEL MEDIO	36
4.1. Edafología.....	36
4.2. Geología.....	46
4.3. Hidrografía.....	48
4.4. Cobertura vegetal.....	49
4.5. Variabilidad climatológica.....	52
4.5.1. El Régimen Pluvial en la Región	53
4.5.2. Distribución espacial de la Lluvia Media Mensual. Mapas de Isoyetas ...	54
4.5.3. Volúmenes captados por la superficie de la Cuenca.....	55
4.6. Hidrometría.....	56
5. CAPITULO IV: METODOLOGÍA.....	58
5.1. Tipo de investigación.....	58

5.2.	Diseño de la investigación	58
5.3.	Proceso metodológico.....	58
5.4.	Separación de caudal base y valoración del recurso.....	64
5.4.1.	Curva de duración de frecuencia.....	64
5.4.2.	Curva de recesión.....	64
5.4.3.	Método filtrado recursivo	64
5.4.4.	Separación del caudal base mediante modelado hidrológico	65
5.5.	Operacionalización de las variables.....	65
6.	CAPITULO V: RESULTADOS.....	67
6.1.	Recopilación de la lluvia diaria en las diversas Estaciones. Precipitación media de la cuenca.....	69
6.2.	Hidrometría Relaciones Escala-Caudal. Resumen de los caudales medios diarios	71
6.3.	Estimación de factores climáticos para sustentar el modelo Lluvia-Escurrentía	72
6.4.	Calibración de la información hidrometeorológica obtenida.....	72
6.5.	Análisis de aportaciones subterráneas	74
6.5.1.	Análisis de Curva de duración de frecuencia.....	74
6.5.2.	Análisis de recesión de los caudales	75
6.5.3.	Método del filtro recursivo digital	77
6.5.4.	Filtro recursivo de doble parámetro.....	78
6.6.	Integración del modelo hidrológico	80
7.	CAPITULO VI: DISCUSIÓN.....	81
7.1.	Comparación de Metodologías	81
7.1.1.	Curva de duración de frecuencia	81
7.1.2.	Curva de recesión.....	82
7.1.3.	Métodos de filtrado	82
7.2.	Análisis volumétrico	83
8.	CAPITULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	85
	BIBLIOGRAFÍA.....	87

INDICE DE ILUSTRACIONES.

Ilustración 1 Esquema ciclo hidrológico.....	16
Ilustración 2 El ciclo hidrológico como un sistema.....	18
Ilustración 3 Clasificación por el método de índice estandarizado de precipitación.	21
Ilustración 4 Distribución de la precipitación.....	22
Ilustración 5 Hidrograma de un río donde se identifica los períodos de recesión (círculos rojos).	26
Ilustración 6 Técnicas de separación de caudal base. a) método de línea recta, b) método de flujo base fijo y c) método de pendiente variable.	27
Ilustración 7 Composición de Curva de Recesión Maestra.	28
Ilustración 8 Ejemplo de modelo hidrológico.....	30
Ilustración 9 Representación esquemática del modelo HBV para una subcuenca.	32
Ilustración 10 Rutina de humedad del suelo.	33
Ilustración 11 Función de transformación.	34
Ilustración 12 Mapa de ubicación del área de estudio.....	36
Ilustración 13 Mapa de ubicación de los sitios de muestreo de suelos.....	37
Ilustración 14 Perfil de Suelo Chandala.....	38
Ilustración 15 Perfil de suelo Chimbo Fuente: Propia para la investigación.....	39
Ilustración 16 Perfil de suelo Cocona Fuente: Propia para la investigación.....	39
Ilustración 17 Perfil de suelo Milile.....	40
Ilustración 18 perfil de suelo Naranjito Fuente: Propia para la investigación.....	41
Ilustración 19 Perfil de suelo Ojojona Fuente: propia para la investigación.....	42
Ilustración 20 Perfil de suelo Sulaco.....	43
Ilustración 21 Perfil de suelos de los Valles Fuente: Propia para la investigación.....	44
Ilustración 22 Mapa de series de suelos según clasificación de Simmons.....	46
Ilustración 23 Mapa geológico de la subcuenca.....	47
Ilustración 24 Mapa de cobertura vegetal.....	50
Ilustración 25 Mapa de distribución espacial de la lluvia media anual para el periodo 1970-2006.....	55
Ilustración 26 Mapa de Ubicación de la estación hidrométrica Ulapa.....	56
Ilustración 27 Proceso metodológico para la recolección de datos espaciales.	59
Ilustración 28 Proceso metodológico para la estimación de los parámetros hidrometeorológicos.	60
Ilustración 29 Formato requerido para el modelo HBV.	62
Ilustración 30 Interfaz del modelo HBV para calibración.	63
Ilustración 31 Proceso metodología para la modelación hidrodinámica de una cuenca..	63
Ilustración 32 Proceso metodológico para la determinación del caudal base (aporte del acuífero al caudal del río). Fuente: Elaboración Propia.....	65
Ilustración 33 Mapa de áreas de influencia de cada estación dentro y próxima a la subcuenca.....	70

INDICE DE GRAGICOS.

Gráfico 1 Curva de duración de frecuencia característica de un río.	25
Gráfico 2 Perfil longitudinal de la corriente principal del Río Jicatuyo	48
Gráfico 3 Histograma de frecuencias altitudinales (izquierda), grafico de equilibrio sedimentario (derecha).....	49
Gráfico 4 Coeficiente Pluviométrico de Angot.	53
Gráfico 5 Hidrograma de caudales medios diarios para el periodo 2001-2008.....	57
Gráfico 6 Curva de Descarga (izquierda), Relación nivel de río - caudal (derecha).....	60
Gráfico 7 Curva de recesión de un río (izquierda), Relación linealizada caudal. tiempo. (derecha).	64
Gráfico 8 Variación de la anomalía en la precipitación para el periodo 1972-2014.	68
Gráfico 9 Grafico de continuidad de las estaciones seleccionadas para el periodo 1971 - 2006.....	70
Gráfico 10 Precipitación media diaria de cuenca para el área de estudio en el periodo 1971 - 2006.	71
Gráfico 11 6 Curva de Descarga de la estación Ulapa para el periodo 2001-2008 (izquierda), Relación nivel de río - caudal (derecha).....	71
Gráfico 12 Hidrograma de caudales medios diarios en la estación hidrométrica Ulapa en el periodo 2001- 2008.....	72
Gráfico 13 Caudales calibrados en la modelación periodo 2001-2005.	73
Gráfico 14 Hidrograma de caudales sintéticos medios diarios para el periodo de simulación 1971 - 2006.	74
Gráfico 15 Curva de duración de frecuencia para la subcuenca para el periodo de simulación 1971- 2006.....	75
Gráfico 16 Curva de Recesión maestra para en la estación hidrométrica Ulapa.	76
Gráfico 17 Curva de recesión envolvente en la estación hidrométrica Ulapa.	76
Gráfico 18 Hidrograma de caudales medios diarios y aportación subterránea.	77
Gráfico 19 Curva de duración de frecuencia de caudal subterráneo.	78
Gráfico 20 Hidrograma de caudales medios diarios y aportación subterránea.	78
Gráfico 21 Curva de duración de frecuencia de caudal subterráneo	79
Gráfico 22 Hidrograma de caudales medios diarios y aportaciones subterráneas mediante modelo hidrológico.	80
Gráfico 23 comparación entre el aporte subterráneo modelado y el valor del 95% de frecuencia.....	81
Gráfico 24 Aportaciones subterráneas estimadas mediante el modelado hidrológico en las épocas de estiaje.....	82
Gráfico 25 Curva de duración de frecuencia del aporte subterráneo mediante los métodos de filtrado recursivo y modelado hidrológico.....	83
Gráfico 26 Volumen de agua en los diferentes estratos de recorrido de agua.	84

INDICE DE TABLAS.

Tabla 1 Características físicas de los suelos encontrados en la subcuenca.....	45
Tabla 2 Resumen de la Características morfométricas más relevantes de la subcuenca ..	49
Tabla 3 Registros de Precipitación medios mensuales de las estaciones La esperanza y Sanata Rosa.....	53
Tabla 4 Registros de temperatura medios mensuales de las estaciones La esperanza y Sanata Rosa.....	53
Tabla 5 Registros de Humedad Relativa medios mensuales de las estaciones La esperanza y Sanata Rosa.....	53
Tabla 6 Volúmenes medios mensuales precipitados dentro de la subcuenca.....	55
Tabla 7 Resumen de aforos realizados en la estación hidrométrica Ulapa, por parte de la DGRH.	57
Tabla 8 Matriz de operacionalización de las variables del estudio.....	66
Tabla 9 Clasificación relativa de la lluvia en la subcuenca	67
Tabla 10 estaciones pluviométricas seleccionadas para la modelación hidrológica en la subcuenca.....	69
Tabla 11 Valores de la Evapotranspiración potencial utilizados para la subcuenca.....	72
Tabla 12 Parámetros utilizados para la modelación hidrología.....	73
Tabla 13 Valores estadísticos propios de la modelación	73
Tabla 14 Valores de caudales para diferentes frecuencias en la estación hidrométrica Ulapa periodo 1971-2006.....	75
Tabla 15 Valores de caudal total y subterráneo para diferentes frecuencias	78
Tabla 16 Valores de caudal total y subterráneo para diferentes frecuencias	79
Tabla 17 Valores de caudal subterráneo para diferentes frecuencias.	83
Tabla 18 Valores de índice de separación de caudal base para cada una de las metodologías.....	83

1. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso natural, finito y vulnerable que resulta esencial para la vida en nuestro planeta. Tiene un valor económico, social y ambiental en todos los usos a los que se destina, por lo que su análisis, administración, planificación y gestión ha de contemplar las relaciones existentes entre la economía, la sociedad y el marco geográfico del espacio físico en donde se desarrolla el ciclo hidrológico, las cuencas hidrográficas.

La conservación del recurso agua y su buena gestión son elementos de vital importancia que repercuten en la sociedad. Las aproximaciones científicas al estudio del ciclo hidrológico, con el objetivo final de que éste sea manejado correctamente y de una manera sostenible, es una necesidad para la sociedad actual, especialmente en entornos donde el agua es un bien escaso y los escenarios futuros diagnostican una disminución de su disponibilidad. Para ello, en la comprensión de los sistemas hidrológicos, se deberán estudiar todos los aportes que reciben los cursos de agua de una cuenca. Estas aportaciones se encuentran asociadas a diferentes procesos físicos que interactúan entre sí de manera más o menos directa y con diferente grado de complejidad, desarrollándose a diferentes escalas espaciales y temporales.

De esta manera, dentro del ciclo hidrológico y dependiendo de la procedencia de los recursos, la escorrentía puede definirse de una manera muy simplificada como la suma de dos componentes; *escorrentía directa*, que se manifiesta como respuesta rápida resultado de episodios de lluvia que superan la entrada de agua a la capacidad de infiltración, y, por otro lado, *escorrentía subsuperficial y basal* correspondiente a la fracción de agua que, una vez infiltrada, recarga y circula a través del suelo y los acuíferos descargando posteriormente su almacenamiento en los ríos, lagos o en el mar. Este segundo tipo de aportes, de respuesta más lenta y continuada y, en la mayoría de los casos, procedente del almacenamiento subterráneo, se denomina flujo base o **caudal base** de un río y su importancia es crucial desde el punto de vista cuantitativo y cualitativo de los recursos del sistema.

Para este estudio, se ha efectuado un estudio indirecto de la relación río-acuífero en la cuenca a partir del análisis de diferentes técnicas y finalmente el uso de un modelo hidrológico para cuantificar procesos que pueden alterar la relación almacenamiento-descarga en el acuífero, donde a diferencia de los modelos de flujo subterráneo, los modelos hidrológicos incluyen en su análisis subprocesos como; evaporación, infiltración, propagación, flujo subterráneo en la zona no saturada, flujo subterráneo en la zona saturada, etc.

2. CAPITULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

2.1 Situación Problemática

Un efectivo manejo de los recursos hídricos requiere que todos los componentes del balance hídrico sean estimados. Dentro de estos componentes, el movimiento del agua en el suelo es de gran relevancia debido a que una parte importante del caudal de los ríos proviene de los acuíferos (caudal base), representando la mayor parte del mismo en el caso de acuíferos poco profundos (Wittenberg, 2003). El aporte de agua subterránea, también conocido como aporte basal, es importante tanto en época de estiaje como durante el periodo lluviosos. Y debido a que algunos ríos mantienen caudales significativos en época seca, principalmente debido a este aporte, se requiere no solo un adecuado conocimiento de los procesos sino también herramientas que permitan estimar con menor incertidumbre este aporte.

El estudio indirecto de la descarga subterránea constituye en la mayoría de los casos la mejor solución en el proceso de cuantificación de las aportaciones del almacenamiento subterráneo en los ríos de una cuenca. La forma de estimar dicho aporte es de especial importancia en los estudios hidrológicos, ya que afecta directamente a dos de los cuatro componentes básicos del balance hídrico: la escorrentía y el almacenamiento de agua, en tal sentido los métodos de separación más empleados son utilizados normalmente para el análisis y predicción de avenidas. Estos métodos emplean algoritmos matemáticos que imitan las técnicas tradicionales de separación gráfica y no los procesos físicos que rigen el proceso (Sloto y Crouse, 1991). En muchos casos las relaciones empíricas que se utilizan para estimar la recarga están limitadas a parámetros y constantes que no son representativas de la heterogeneidad del lugar, y en algunos casos no cuenta con una base física que los explique. Por lo que es necesario el empleo de nuevas técnicas que permitan una mejor aproximación de la recarga subterránea de la cuenca. Así mismo, las curvas de recesión (i.e., El momento que el agua subterránea contribuye más al caudal del río que la escorrentía superficial) representan de manera matemática el comportamiento de los acuíferos, permitiendo desarrollar una propuesta de modelado del flujo subterráneo con mayor acierto. En este sentido la inclusión de modelos hidrológicos en la estimación de la recarga de acuíferos (Caudal base) ha sido poco aplicada. Sin embargo, con el desarrollo de nuevos modelos que pueden reproducir las propiedades y características de los acuíferos, la estimación de los aportes subterráneos al caudal del río puede ser mejorado.

2.2. Formulación del problema de investigación

2.3.Preguntas de Investigación

¿Se puede estimar el comportamiento hídrico en una cuenca integrando los aportes subterráneos al caudal base utilizando modelos hidrodinámicos?

2.4. Objetivos de la investigación

La detección del aporte basal al caudal de una cuenca a fin de desarrollar una relación simple entre el caudal superficial y la recarga subterránea mediante la aplicación de modelos hidrológicos

2.5. Objetivo general:

Integrar los aportes subterráneos al caudal del Río Jicatuyo durante 1971-2006 mediante el uso de modelos hidrológicos dinámicos.

2.6. Objetivos específicos:

- Describir el comportamiento integral de la cuenca del Río Jicatuyo en relación a los procesos que determinan la cantidad del agua dentro de la cuenca.
- Valorar los diferentes enfoques disponibles en el modelado de las aportaciones subterráneas a escala de cuenca.
- Cuantificar la variabilidad espaciotemporal del aporte subterráneo.
- Estimar el comportamiento hídrico en la cuenca.

2.7. Justificación de la Investigación

El análisis de la respuesta subterránea y su cuantificación dentro del estudio del ciclo hidrológico y todos sus procesos, es uno de los más comunes y al mismo tiempo uno de los problemas más complejos en la hidrología. En este sentido, comprender la aportación de agua subterránea a los ríos es fundamental cuando se trata de una amplia gama de asuntos relacionados con la gestión del recurso hídrico, como ser: el abastecimiento público, la generación de energía hidroeléctrica, uso agro-industrial, entre otros. Sin embargo, en la actualidad se ha observado que para una adecuada gestión de los recursos hídricos, no solamente se requiere de un monitoreo continuo sino también de las herramientas y metodologías adecuadas para el análisis de las aportaciones de dichos caudales. Lo anterior se ve también condicionado por la dificultad en la obtención de datos de medida directa y las complejas características del marco hidrogeológico de muchos ríos.

Dado que los principios básicos que explican las interacciones río-acuífero son esenciales para el manejo efectivo de los recursos hídricos y su modelado. Larking y Sharp (1992) clasificaron estas interacciones basándose en el componente regional predominante del flujo subterráneo:

- **Componente de flujo inferior:** El flujo subterráneo se mueve paralelo y en la misma dirección que el río.
- **Componente de flujo base:** El flujo subterráneo se mueve perpendicularmente desde o hacia el cauce principal dependiendo de si este es ganador o perdedor
- **Mixto:** Situación intermedia de las dos anteriores.

El componente dominante del flujo subterráneo sea de tipo caudal base o de tipo inferior, puede deducirse a partir de datos geomorfológicos tales como la pendiente de canal, la sinuosidad del río, el grado de incisión del río en el aluvial, la relación anchura-profundidad de las orillas del cauce y el carácter de depósito del sistema fluvial.

El flujo de tipo inferior es predominante en sistemas fluviales con importante pendiente de canal, baja sinuosidad, amplio intervalo anchura-profundidad, de bajo grado de incisión en el río y en zonas de depósito. El flujo base dominante se encuentra en ríos de características geomorfológicas contrarias a las anteriores. Los sistemas con flujo mixto ocurren cuando el gradiente longitudinal del valle y la pendiente del cauce son prácticamente iguales y además la pendiente lateral del valle es despreciable (Larking y Sharp, 1992).

El estudio de esta interacción entre los sistemas subterráneos y los aportes superficiales se ha desarrollado mucho a lo largo de las últimas dos décadas debido al interés en cuantificar los recursos desde una perspectiva ecológica y estudiar los efectos del transporte de sustancias dentro del ciclo hidrológico.

Generalmente, las aportaciones de caudal base procedentes del almacenamiento subterráneo se han estudiado a partir de las interacciones entre el nivel freático del acuífero y el río produciéndose en esta relación, ganancias o pérdidas en el caudal superficial del propio río. Estos estudios suponen acuíferos ideales no confinados, de extensión infinita, homogénea y completa o parcialmente conectados con el río.

Cuando un río se encuentra en contacto con un acuífero libre, la dirección del flujo puede ser hacia el acuífero, en cuyo caso el río alimenta al acuífero denominándose río influyente, o por el contrario hacia el río, recibiendo éste agua procedente del acuífero denominándose río efluente. Esta situación puede cambiar a lo largo del curso del propio río, siendo común la identificación de tramos influentes y efluentes.

Los mecanismos físicos por los cuales el agua almacenada en el suelo aporta caudales a los ríos en cuencas de montaña, han sido muy poco estudiados debido a la complejidad de estos sistemas y a las dificultades en el proceso de su conceptualización. Muchos los autores (Brutsaert y Nieber, 1977; Tallaksen, 1994) sugieren el análisis de la pendiente de recesión de caudales (dQ/dt), como método más fiable para el estudio de las aportaciones del almacenamiento subterráneo, sobre todo en estudios dirigidos al sistema cuenca en su globalidad.

Es así que separación del hidrograma es una estrategia bien establecida en la comprensión de la magnitud y la dinámica de la descarga de aguas subterráneas estos procedimientos consideran tres componentes: flujo basal o flujo aportado por el acuífero, flujo subsuperficial o flujo procedente de la zona no saturada y escorrentía superficial (Peters y Van Lanen, 2005), agrupándose en la mayoría de los casos el flujo subsuperficial y la escorrentía superficial en un solo flujo denominado flujo rápido.

De esta forma el estudio indirecto del almacenamiento subterráneo constituye mejor herramienta en el proceso de cuantificación de las aportaciones del almacenamiento subterráneo en los ríos de una cuenca. Los análisis de recesión representan las propiedades del almacenamiento y características básicas de los acuíferos, permiten comprender mejor el sistema y desarrollar una propuesta de modelado del flujo subterráneo con mayor acierto.

La caracterización de estas épocas de recesión es extremadamente útil en la estimación del aporte de agua y en el estudio de la relación río-acuífero. Su análisis ha sido fundamental en muchas áreas tanto para la gestión, como para la planificación de recursos hidrológicos, siendo un recurso interesante para su uso como índice del almacenamiento de la cuenca y proporcionando un modo de estimación de las reservas en cuencas carentes de datos (Tallaksen, 1994).

Por otra parte, este análisis puede ser una herramienta imprescindible en la determinación de parámetros de modelos hidrológicos e hidrogeológicos (Harling, 1991). Otra aplicación importante de la información aportada por las curvas de recesión es la separación del componente de caudal base de la serie de datos de caudal (Nathan y MacMahon, 1990; Chapman y Maxwell, 1996).

Este trabajo plantea como alternativa a los métodos tradicionales separar el caudal en sus diferentes componentes por medio de un modelo hidrológico en una pequeña cuenca.

2.8. Hipótesis de la Investigación

¿Son los modelos hidrológicos una mejor opción para determinar el aporte basal en comparación a las técnicas tradicionales?

3. CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

3.1.El ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico es el foco central de la hidrología. No tiene principio ni fin y sus procesos ocurren en forma continua: el agua se evapora desde los océanos y de la superficie terrestre para volver a la atmósfera; el vapor de agua se transporta y se eleva hasta que condensa y precipita sobre la superficie terrestre o los océanos; el agua precipitada puede ser interceptada por la vegetación, convertirse en flujo superficial sobre el suelo, infiltrándose en él, escurrir por el suelo como flujo subsuperficial y descargar en ríos como escorrentía superficial; 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 y finalmente fluye hacia el mar o se evapora (Chow, 1959).

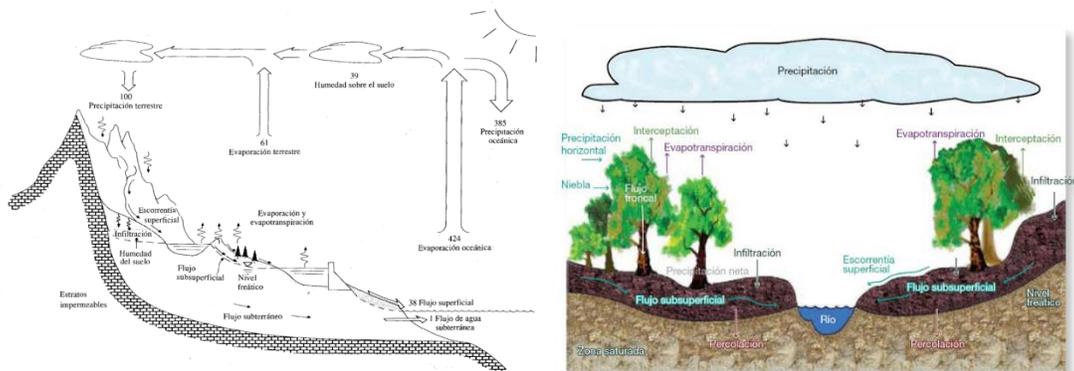


Ilustración 1 Esquema ciclo hidrológico.
Fuente v. Chow, 1994 y Mulligan, 2005.

La descripción conceptual de las variables que intervienen en el ciclo hidrológico se presenta consecutivamente, de acuerdo con el orden de los procesos en la dirección del flujo del agua en los ecosistemas; es decir, entradas por precipitación en todas sus formas (vertical y horizontal: lluvia que es transportada por el viento y la niebla), precipitación neta dentro del bosque, agua en el horizonte orgánico, escorrentía superficial, infiltración de la precipitación, evapotranspiración, agua en el suelo, percolación profunda y drenaje a nivel de cuenca. Tobón, 2009 describe el comportamiento de los procesos que intervienen en el ciclo hidrológico de la siguiente manera:

Precipitación: La precipitación es la principal entrada de agua en los ecosistemas terrestres; sin embargo, en algunas regiones de la Tierra, las cuencas pueden también recibir regularmente entradas adicionales de agua por la interceptación de la niebla, de la lluvia transportada por el viento y por deshielo de glaciales (Tobón et al., 2008; Rollenbeck et al., 2008).

Escorrentía superficial e infiltración: Una vez que el agua alcanza la superficie del suelo, puede seguir dos vías: se infiltra en el suelo y fluye a través de éste, o se escurre superficialmente. Esto está controlado por la capacidad de infiltración de cada tipo de suelo en particular, las características de la precipitación, el estado de humedad del suelo y la pendiente.

Agua en el suelo: es la capacidad que tienen los suelos de retener humedad, capacidad que depende de varios factores entre los cuales se destacan: la textura, la densidad aparente, los coloides del suelo y la materia orgánica. Esto y la presencia de lluvia hacen que los suelos permanezcan húmedos o secos. Una vez que el agua infiltra la superficie del suelo, los flujos principales son (Cavelier, 1991):

- Drenaje vertical o percolación profunda: la excesiva agua en el suelo sale de la zona de raíces y fluye verticalmente hasta encontrar el nivel freático. Este flujo alimenta quebradas y ríos y estabiliza su caudal, aún en períodos de sequía, cuando las reservas del agua del suelo disminuyen drásticamente.
- Drenaje horizontal o subsuperficial a través de la pendiente: en la alta montaña este proceso está condicionado especialmente por la superficialidad del estrato rocoso. Esta cantidad de agua sale rápidamente de los ecosistemas, bien sea durante los eventos de precipitación o algunas horas después de éstos.
- Absorción de agua por las raíces de la vegetación y su intercambio con la atmósfera a través de la evapotranspiración. en la mayoría de los bosques montaña, la evapotranspiración es inferior a la de otros, debido a la frecuencia de nubes bajas o niebla, la baja radiación, las bajas temperaturas y la alta humedad relativa.

Evaporación: es el principal proceso mediante el cual, el agua cambia de estado líquido a gaseoso. La evaporación es el proceso por el cual el agua líquida de los océanos ingresa a la atmósfera, en forma de vapor, formando parte del ciclo del agua.

Transpiración: es el proceso por el cual el agua es llevada desde las raíces hasta pequeños poros que se encuentran en la cara inferior de las hojas, donde se transforma en vapor de agua y se libera a la atmósfera. La transpiración, es esencialmente la evaporación del agua desde las hojas de las plantas.

Evapotranspiración: es la combinación de evaporación desde la superficie del suelo, evaporación por agua interceptada por la vegetación y evaporación generada por el proceso biológico de la transpiración de los seres vivos (para efectos del ciclo hidrológico se considera únicamente la transpiración por la biomasa vegetal). Los mismos factores que dominan la evaporación desde una superficie de agua abierta también dominan la evapotranspiración, los cuales son: el suministro de energía y el transporte de vapor. Además, el suministro de humedad a la superficie de evaporación es un tercer factor que se debe tener en cuenta. A medida que el suelo se seca, la tasa de evapotranspiración cae por debajo del nivel que generalmente mantiene en un suelo bien humedecido.

3.2.Ciclo hidrológico como un sistema

Los fenómenos hidrológicos son extremadamente complejos y es posible que nunca se les pueda entender en su totalidad. Sin embargo, como lo describe Arturo Rosenblueth (1971), la ciencia busca entender aspectos dinámicos de la naturaleza que puedan ser descritos a través de modelos abstractos y/o teorías lógicas que representen las relaciones funcionales

existentes en la naturaleza. En este sentido, en ausencia de un conocimiento perfecto, algunos procesos en la naturaleza pueden representarse en forma simplificada por medio del concepto de sistema. Un sistema es un conjunto de partes conectadas entre sí, que forman un todo. El ciclo hidrológico puede tratarse como un sistema cuyos componentes son la precipitación, evaporación, el cual aunado a la transpiración e interceptación del agua componen lo que se conoce como evapotranspiración, la escorrentía y otras fases del ciclo hidrológico. Como se muestra en la siguiente ilustración, estos componentes pueden agruparse en subsistemas del ciclo total; para analizar el sistema total, estos subsistemas más simples pueden analizarse separadamente y combinarse los resultados de acuerdo con las interacciones entre los subsistemas. (Chow, 1994).

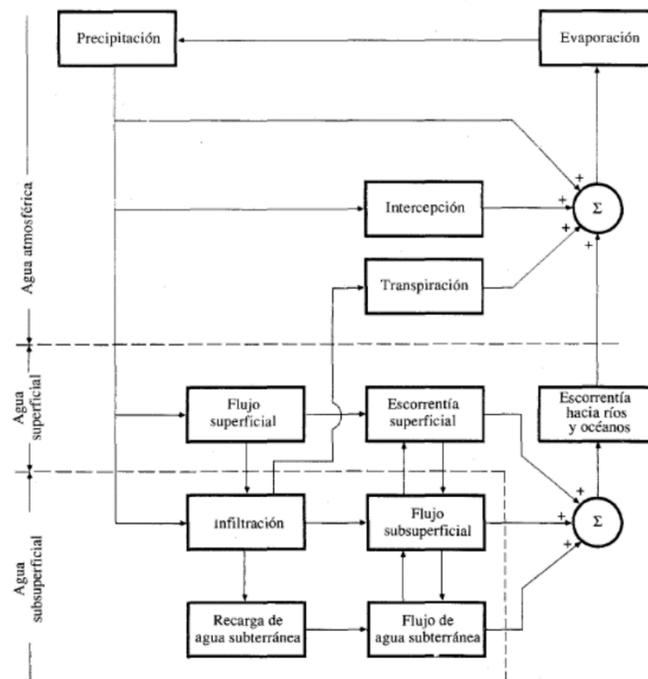


Ilustración 2 El ciclo hidrológico como un sistema.
Fuente: v. Chow, 1994.

El planteamiento del ciclo hidrológico como un sistema, permite simplificar los procesos que aún no son entendidos en su totalidad, aún más, algunos de estos factores que intervienen no se pueden medir y únicamente se realizan estimaciones. En términos de este estudio, el ciclo hidrológico se acota a un área determinada donde los factores involucrados en el proceso hidrológico tienen sus manifestaciones, observándose finamente los acuíferos y los ríos del área de acción. En términos generales se describen a continuación los tres componentes básicos:

Cuenca y acuífero: La cuenca es la mejor unidad espacial en la hidrología para llevar a cabo estudios y planificación del agua de manera sistemática. Las actividades y los impactos de la biosfera y antropogénicos generalmente se discuten en la escala de cuencas hidrográficas. Por lo tanto, la determinación de las características de la cuenca es un concepto importante. La cuenca puede definirse bien como un área que puede considerarse un sistema hidrológico acotado, dentro del cual todos los componentes vivos están

vinculados entre sí con respecto a sus recursos de suministro de agua. Las principales características de una cuenca son la salida y el límite. El límite de la cuenca también se conoce como el límite de la división de agua y la salida es el punto en el que se recolectan todas las aguas superficiales de la cuenca. Además de las características de las cuencas hidrográficas que afectan la respuesta de la cuenca a la lluvia. (M. Karamouz, 2013).

El agua infiltrada en el suelo es empujada hacia abajo por la gravedad a través de los poros de los diferentes horizontes del suelo hasta que alcanza una profundidad donde todos los poros se llenan con agua, llamada agua subterránea. El acuífero es la formación geológica que permite que el agua subterránea se almacene y se transporte. Es una combinación de diferentes capas de estratos permeables o fracturados.

Un acuífero proporciona características similares a las de una cuenca hidrográfica donde el agua se mueve subterráneamente, de forma irregular y está compuesta por almacenamientos entre las partículas del suelo. Cuando el suelo o la roca se satura, el nivel de agua resultante se denomina nivel freático. El nivel freático no siempre está a la misma profundidad por debajo de la superficie. Durante los períodos de alta precipitación, el nivel freático puede elevarse. Por el contrario, durante los períodos de baja precipitación y alta evapotranspiración, el nivel freático cae. (M. Karamouz, 2013).

Cuerpo de agua: Este se define como una zona por donde el volumen de agua recolectado por la cuenca se almacena y/o transporta, pudiendo ser un canal del río o lagos. Para efectos de este estudio, se describe únicamente con relación al Río. En este sentido el flujo de la corriente es muy variable a lo largo del tiempo debido a la alta dependencia de la precipitación en la cuenca. Las precipitaciones pueden hacer que los ríos suban, incluso si llueve muy lejos del punto de observación de la cuenca. Las respuestas de los ríos con diferentes tamaños difieren con las tormentas y las lluvias. La tasa de aumento y disminución del caudal en los ríos grandes es mucho más lenta que en los ríos pequeños. La respuesta del río en diferentes puntos a través de su longitud varía.

Desde el punto de vista hidrológico el ciclo hidrológico se estima a través del balance de los volúmenes de entrada y salida al sistema, lo que permite según la complejidad inferir en los volúmenes que circulan en el sistema, hasta verlos reflejados en la respuesta del río. Esto se conoce como balance hídrico y se describe a continuación.

Balance Hídrico: comprende la cuantificación de los parámetros involucrados en el ciclo hidrológico así, como diversos componentes relacionados con los consumos de agua de los distintos usuarios en una cuenca y la interrelación que guardan entre sí, dando como resultado un diagnóstico de las condiciones reales del recurso hídrico en cuanto a su oferta, disponibilidad y demanda en la cuenca. El modelo de balance hídrico se basa entonces en la ecuación de conservación de masa, que dependerá del volumen de control y de las condiciones de frontera existentes.

$$\Delta S = I - O$$

Aquí ΔS es el cambio de almacenamiento en el sistema, I las entradas del sistema y O las salidas del mismo. En general, el modelo de balance hídrico considera como variable principal de entrada la precipitación incidente (PG) y la evaporación (E) como variable principal de salida. La ecuación del balance hídrico está sujeta al volumen de control y los supuestos que el investigador defina en el estudio.

Y como se puede apreciar el principal componente de entrada en una cuenca es la precipitación, por lo que ésta se debe caracterizar espacial y temporalmente, así como también estimar la magnitud (por lo general en milímetros) que entra al sistema. A continuación, se describe la metodología empleada.

Precipitación media de cuenca: consiste en la precipitación media caída sobre una cuenca, esta se puede estimar a través de diferentes aproximaciones entre estas la que se describe a continuación:

Método de Thiessen: desarrollado por Alfred H. Thiessen (1911) meteorólogo estadounidense. El método establece que en cualquier punto de la cuenca la lluvia es igual a la que se registra en el pluviómetro más cercano; luego la profundidad registrada en un pluviómetro dado se aplica hasta la mitad de la distancia a la siguiente estación pluviométrica en cualquier dirección. Los pesos relativos de cada pluviómetro se determinan de las correspondientes áreas de aplicación en una red de polígonos, denominados Polígonos de Thiessen, cuyas fronteras están formadas por los bisectores perpendiculares a las líneas que unen pluviómetros adyacentes. Si existen J pluviómetros y el área de la cuenca que se asigna a cada uno de ellos es A_j y P_j es la lluvia registrada en el pluviómetro j-ésimo, la precipitación promedio para la cuenca sobre el área se determina de la siguiente forma:

$$\bar{P} = \frac{1}{A} \sum_{j=1}^J A_j P_j$$

el área de la cuenca es A, A_j el área de influencia de cada polígono y P_j la precipitación de cada una de las estaciones utilizadas.

Caracterización climática: consiste en establecer el estado de la atmósfera en períodos largos de tiempo (meses, años, período multianual), en este caso se consideró los valores de precipitación anuales. Y utilizando la lógica del método del índice de precipitación estandarizada (SPI por sus siglas en inglés) desarrollado por McKee, Doesken y Kleist (1993), este método se define a través de una estandarización de la precipitación. Esta estandarización corresponde a la diferencia de precipitación a partir de la media para un determinado periodo de tiempo, dividido por la desviación estándar. Permitiendo entonces, clasificar los años hidrológicos según sean secos, normales y húmedos, como se muestra en la siguiente ilustración No.3.

Rango	Clasificación
$z \leq -1.5$	<i>Año Muy Seco</i>
$-1.5 < z \leq -0.5$	<i>Año Seco</i>
$-0.5 < z \leq 0.0$	<i>Año Promedio Seco</i>
$0.0 < z \leq 0.5$	<i>Año Promedio Lluvioso</i>
$0.5 < z \leq 1.5$	<i>Año Lluvioso</i>
$z > 1.5$	<i>Año Muy Lluvioso</i>

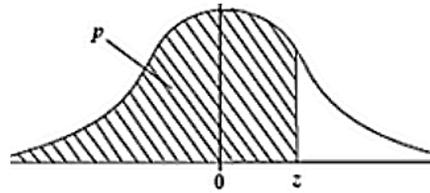


Ilustración 3 Clasificación por el método de índice estandarizado de precipitación.
Fuente: elaboración propia

Otro elemento que es de importancia estimar es el valor de evapotranspiración, valor que como se mencionó con anterioridad se puede estimar mediante estimaciones matemáticas. Entre las metodologías para poder estimar este componente se destaca el método de Hargreaves, el cual se describe a continuación.

Método de estimación de la evapotranspiración de Hargreaves: este método fue desarrollado por George Hargreaves en 1985, para Honduras y la región centroamericana, tomando como referencia la evapotranspiración de los cultivos de maíz y frijol, además de la evapotranspiración estimada al pasto.

La fórmula evalúa la evapotranspiración potencial, es decir, la tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia, que ocurre sin restricciones de agua, la cual se encuentra condicionada solo por factores climáticos necesitando en este caso datos de temperatura y radiación extraterrestre, que dependen de la latitud en que se encuentre la estación hidrológica y los meses en los que se va a calcular la evapotranspiración.

$$ETP = 0.0023 RAM (T_m + 17.8) T_d^{1/2} \text{ [mm.día}^{-1}\text{]}$$

RAM es un dato estadístico que se obtiene de la tabla Radiación Extraterrestre ($1 \text{ mm.día}^{-1} = 2.45 \text{ MJ.m}^2.\text{día}^{-1}$). T_m temperatura media y T_d rango de temperatura ($^{\circ}\text{C}$)

Así como la precipitación y la evapotranspiración son importantes en el balance hídrico, uno de los resultados más importantes es la cantidad de agua que sale del sistema en forma de escorrentía superficial, lo que se conoce comúnmente como caudal, que llega a los distintos cuerpos de agua.

Caudal: es el volumen de agua que pasa por una sección en un periodo de tiempo, en los cursos naturales es el agua que fluye y forma los ríos, manantiales y arroyos, y es la respuesta a todos los procesos físicos que se dan dentro de la cuenca. La forma más común de determinar el caudal es mediante la medición de la descarga de la corriente del río, lo que se denomina aforo de la corriente. Sin embargo, para tener una serie de tiempo se buscan relaciones indirectas para estimar el caudal, esta relación parte de los niveles de agua que puede alcanzar la corriente de agua en una sección determinada (también conocido como altura h). Dando como resultado generalmente una relación de univocidad en secciones controladas, a cada nivel corresponde un caudal. Esta relación se obtiene

correlacionando los aforos puntuales que se practican en la corriente y el nivel que presenta durante la practica el mismo, posteriormente una curva se dibuja mediante el trazado de "caudal Q vs. altura h' que se llama 'curva de descarga'. La relación entre la descarga y la altura de nivel se puede expresar como:

$$Q = K(h - h_0)^n$$

Siendo que K y n , son constantes propias de la sección de aforo, h_0 es la lectura de nivel correspondiente a cero caudales, el valor de h_0 no se conoce y las observaciones realizadas son valores de Q correspondientes para lecturas h . Entonces, h_0 se determina asumiendo valores de prueba y error.

Cuando se cuenta con una serie lo suficientemente extensa se pueden generar a partir de los caudales un hidrograma de caudal, el cual es una gráfica o una tabla que muestra la tasa de flujo como función del tiempo en un lugar dado de la corriente. El hidrograma es "una expresión integral de las características fisiográficas y climáticas que rigen las relaciones entre la lluvia y la escorrentía de una cuenca de drenaje particular" (Chow, 1959).

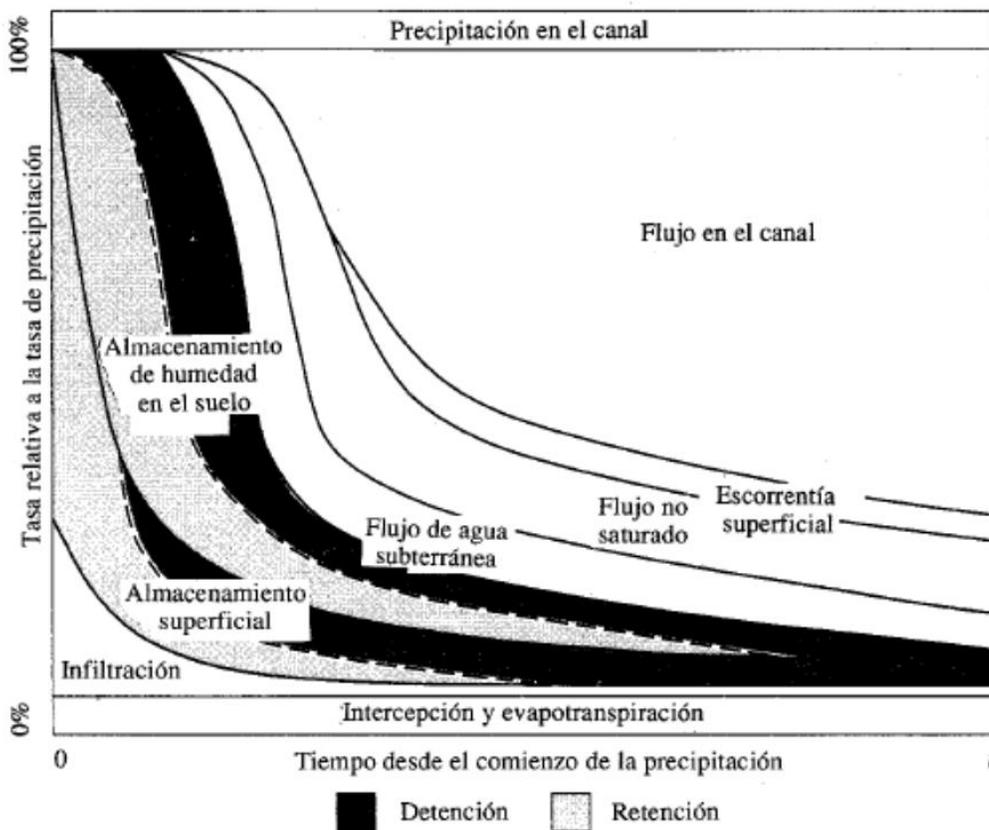


Ilustración 4 Distribución de la precipitación.
Fuente: v. Chow 1994

En efecto, el hidrograma de un río es la respuesta final a los procesos hidrológicos, es la suma de los caudales de salida hacia el río provenientes, como se muestra en la imagen

anterior, escorrentía superficial, escorrentía subsuperficial y escorrentía profunda o subterránea.

Todo lo anterior lleva al enfoque de esta investigación que es determinar el aporte proveniente de la recarga subterránea, lo que se conoce como caudal base.

Caudal base: es el flujo que proviene del aporte subterráneo y no se encuentra relacionado directamente a la precipitación. La respuesta del caudal base es, en general, lenta y continua y se distingue de las aportaciones correspondientes a ocurrencia de precipitación, de respuesta más rápida y de incorporación inmediata en el flujo superficial. Este flujo lento mantiene los caudales en los ríos en los periodos entre-eventos constituyendo las aportaciones más duraderas hacia el río durante el ciclo hidrológico anual. Sin embargo, las aportaciones subterráneas a la red de drenaje pueden producirse en ocasiones de una manera rápida contribuyendo de forma importante en la aportación inmediata post-evento (Ward, 1984). Los mecanismos a través de los cuales el flujo subsuperficial pasa rápidamente a los ríos como respuesta a una entrada, han sido descritos en diferentes estudios (Ward 1984; Beven, 1989; Dingman 2001). Beven (1989) identifica cuatro mecanismos responsables de estas contribuciones rápidas del sistema subsuperficial:

- **Flujo traslacional:** También conocido como efecto de flujo de pistón (Hewlett y Hibbert, 1967), es un fenómeno muy común y fácilmente observable en un suelo con humedad correspondiente a la capacidad de campo cuando se añade agua. El agua entrante empuja de manera inmediata el agua latente en el suelo produciendo una mayor rapidez en la recarga del sistema subterráneo o en las aportaciones como caudal lateral.
- **Flujo por macroporos o fracturas:** Otro mecanismo de respuesta rápida ante la recarga procedente de un evento puede ser el flujo rápido a través de macroporos o fracturas existentes en el suelo (Beven y Germann, 1982).
- **Cuña de agua subterránea:** Este efecto describe los aportes rápidos del agua subterránea producidos por un incremento brusco del nivel freático durante periodos de tormenta. El gran aumento en el potencial cercano al río produce un incremento del gradiente hidráulico. La contribución en el cauce inducida puede superar a la cantidad de agua entrante, realizándose de forma relativamente rápida hacia el cauce. Este almacenamiento en las orillas puede determinarse cuantitativamente conociendo los datos geológicos y controlando los niveles piezométricos en los márgenes del río. Diferentes estudios correspondientes a eventos en cuencas durante periodos de estiaje han demostrado que el almacenamiento subsuperficial puede ser muy importante en el hidrograma de escorrentía del evento debido a la movilización rápida de este recurso en las zonas cercanas al cauce (Sklash y Farvolen, 1979).
- **Flujos de retorno:** Cuando el nivel freático se encuentra próximo a la superficie del suelo, precipitaciones poco intensas pueden saturar completamente el suelo y encharcar la superficie generando la descarga de agua subsuperficial hacia la superficie (Dunne y Black, 1970). Esta área encharcada puede expandirse rápidamente convirtiéndose en una zona de saturación y, por tanto, de producción de escorrentía.

El tipo de respuesta de una cuenca puede estar dominado por uno de estos procesos o por su combinación dependiendo de la magnitud del evento, las condiciones de humedad del suelo previas al evento y/o la heterogeneidad de las propiedades hidráulicas del suelo (Sklash, 1990). Otros estudios han demostrado que el agua movilizada en el suelo por infiltración puede aportar caudales importantes durante el propio evento en periodos secos, a pesar de los importantes déficits de humedad del suelo.

Por todo esto, atendiendo a las aportaciones correspondientes a caudal base desde la zona saturada del suelo, pueden existir diferencias en el tipo de respuesta dependiendo del estado inicial de la zona saturada y del tipo de material que compone el acuífero. Las respuestas rápidas procedentes del suelo en el periodo post-evento (caudal lateral o *interflow*) presentan una duración más corta que las aportaciones de caudal base, aunque los mecanismos que condicionan la respuesta son válidos para ambos sistemas (suelo-zona saturada).

3.3. Estimación de las aportaciones subterráneas

Como se vio en la sección anterior, una parte importante del caudal de los ríos proviene de la descarga de los acuíferos, representando la mayor parte del mismo en el caso de acuíferos poco profundos (Wittenberg, 1999). Esta procedencia suele ser importante tanto en la época de estiaje como durante los periodos lluviosos, por tan motivo varios investigadores han planteado matemáticamente el régimen de descarga subterránea o caudal base de un curso (Boussinesq, 1904 y Maillet, 1095, en Custodio y Llamas, 1976). Entre alguno de ellos están:

3.3.1. Análisis mediante curva de duración de frecuencia (CDF)

La curva de duración de frecuencia (CDF) es una representación gráfica de la descarga de un río clasificada según frecuencia de excedencia, la facilidad que presenta este análisis es que indica el porcentaje del tiempo que un caudal en particular es superado. Es fácil de construir y utilizar en muchas aplicaciones diferentes de recursos hídricos y en todos los rangos de caudales de los ríos. La construcción se basa en la clasificación de los datos (por lo general, la descarga diaria) y el cálculo de la frecuencia de superación para cada valor. Reordena efectivamente el hidrograma observado de uno ordenado por tiempo a uno ordenado por magnitud.

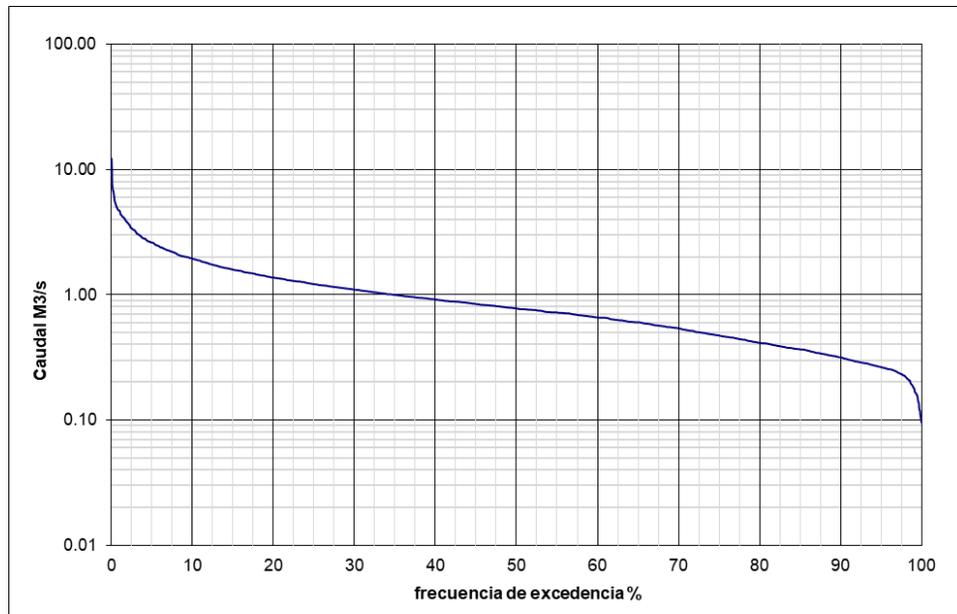


Gráfico 1 Curva de duración de frecuencia característica de un río.
Fuente: Elaboración Propia.

El porcentaje de tiempo que se excede cualquier descarga en particular puede estimarse de la gráfica. Con frecuencia se usan percentiles específicos de la curva, por ejemplo, el flujo excedido en el 50 por ciento del tiempo. Por ejemplo, al realizar una CDF anual, se tendrá que el caudal excedido durante 180 días es de $0.76 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

3.3.2. Técnicas de separación de caudal base en series temporales

Las técnicas de separación de caudales usan series temporales de caudal en un punto con el fin de discretizar las aportaciones del sistema. Los métodos más comunes de separación de caudales suelen ser gráficos, es decir, a partir de la información registrada de caudal.

La separación entre caudal medido y caudal correspondiente al caudal base puede estudiarse a través del denominado Índice de Caudal Base (ICB), que expresa la importancia del caudal base en una cuenca.

$$ICB = \frac{\text{Aportes Subterráneos}}{\text{Aportes Totales}}$$

La mayor parte de los procedimientos de separación contemplan los 3 componentes de flujo considerados en este trabajo, es decir; caudal base, caudal lateral o flujo procedente de la zona no saturada y escorrentía superficial. Sin embargo, la separación se realiza generalmente en dos componentes: caudal base y rápido, estando el flujo procedente de la zona no saturada, repartido entre ambos dependiendo básicamente del tiempo de respuesta del sistema estudiado y del método empleado.

3.3.3. Métodos gráficos de separación

La separación gráfica de diferentes componentes del caudal ha sido definida como “una de las técnicas de análisis más desesperadas usadas en hidrología” (Hewelett y Hibbert, 1967). Sin embargo, estas técnicas proporcionan, de una manera sencilla, una primera aproximación en la determinación de los diferentes componentes del de caudal, permitiendo relacionar el ICB con diferentes parámetros físicos de la cuenca.

3.3.4. Separación a escala de evento

Los métodos gráficos han sido muy utilizados para separar el componente correspondiente al flujo base en hidrogramas de escorrentía registrados durante tormentas. Se basan en la localización gráfica de los puntos donde empiezan y terminan los procesos de recesión y escorrentía directa. Para la localización de estos puntos, se suele recurrir al análisis de recesión de caudales en busca de la Curva Maestra de Recesión de caudal base (Horton, 1933).

El agotamiento gradual del agua almacenada en un período seco de la cuenca con poca o ninguna precipitación se refleja en la forma de la curva de recesión, es decir, la parte descendente del hidrograma (ilustración No.5). La curva de recesión describe en una forma integrada cómo diferentes almacenamientos y procesos de captación controlan la salida del río. Los ríos con una tasa de recesión lenta suelen estar dominados por las aguas subterráneas o lacustres, mientras que una recesión rápida es característica de los ríos con acuíferos poco productivos con almacenamiento lineal.

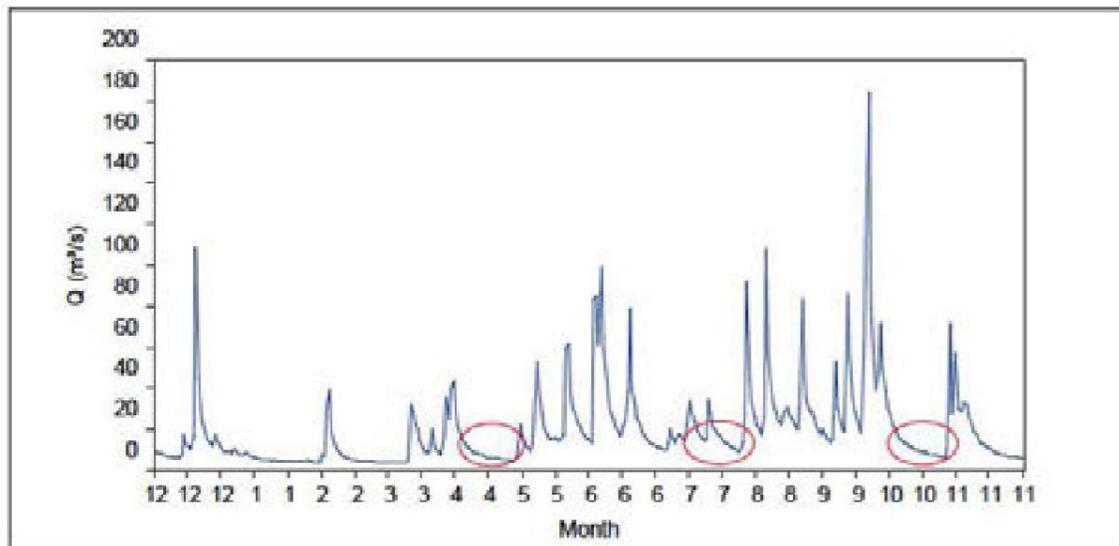


Ilustración 5 Hidrograma de un río donde se identifica los períodos de recesión (círculos rojos).

Fuente: OMM, 2008.

Como se observa en muchos hidrogramas, la curva de agotamiento el agua subterránea para una cuenca dada, o al menos sus segmentos siguen una simple función exponencial inversa del tiempo transcurrido de la forma:

$$Q_t = Q_0 e^{-(t-t_0)k}$$

Siendo Q_0 el flujo en el tiempo t_0 y k es la constante de decaimiento exponencial que tiene dimensiones de tiempo (Singh y Stall, 1971). A partir de estas consideraciones varios autores han propuesto diversas metodologías para localizar los periodos de tiempo en los cuales el hidrograma de caudal coincide con la curva de recesión de flujo base identificando diferentes puntos hidrograma. (Chow, 1964). Identificando los periodos de tiempo en los cuales el hidrograma del caudal coincide con la curva de recesión del flujo base, se pueden identificar los puntos donde empieza y termina la escorrentía directa. Entre estos puntos la escorrentía directa y el flujo base pueden separarse utilizando varios métodos. Algunos métodos alternativos para la separación del flujo base son: a) el método de la línea recta, b) el método de flujo base fijo y e) el método de la pendiente variable. Estos métodos se ilustran en la ilustración No.6.

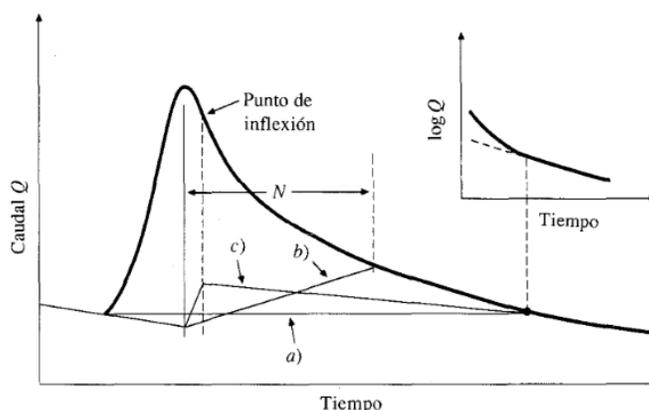


Ilustración 6 Técnicas de separación de caudal base. a) método de línea recta, b) método de flujo base fijo y c) método de pendiente variable.

Fuente: v. Chow, 1994.

El método de la descarga constante o de la línea recta se basa en la hipótesis, simplificando el problema, de caudal base constante durante todo el evento (Linsley *et al.*, 1982). El valor mínimo de la recesión previa al evento es utilizado como constante de estimación del caudal base. Este método es aplicable a las corrientes efímeras (i.e., corrientes de agua que solo aparecen durante episodios de lluvia).

Los métodos de la pendiente constante y de la pendiente variable, se basan en establecer relaciones entre los puntos de inflexión existentes a partir del valor máximo del hidrograma. Usando las proyecciones correspondientes a los tramos antes y después del evento es posible establecer los límites del caudal base (Frohlich *et al.*, 1994). De esta manera, se puede estimar el caudal base con una sola línea (método de pendiente constante) que une el inicio del hidrograma, admitiendo una respuesta instantánea del flujo base ante el evento, con el segundo punto de inflexión correspondiente a la recesión. Otra aproximación puede realizarse proyectando una línea desde la recesión inicial hasta el valor máximo del hidrograma, para unirla posteriormente con la proyección del primer punto de inflexión de la recesión y finalmente al último punto de recesión. Se genera de esta manera una pendiente variable.

Ambos métodos anteriores, consideran que la escorrentía superficial termina un tiempo N después del valor máximo del hidrograma. De esta manera, el caudal base antes del evento se proyecta en línea recta y desde allí se proyecta una línea hasta el tiempo N después del valor máximo. Para la estimación se establece una relación empírica considerando el área de la cuenca mediante la expresión:

$$N = 0.827A^{0.2}$$

Aquí N es el número de días entre el valor máximo del hidrograma y el punto de inflexión y A el área de la cuenca en km^2 (Linsley *et al.*, 1982). El valor del exponente de esta expresión, **0.2**, puede variar dependiendo de características de la cuenca como la pendiente, la vegetación y la geología.

3.3.5. Curva de recesión maestra (CRM)

La Curva de Recesión Maestra (CRM) de un sistema hidrológico representa el resumen de todos los fragmentos de recesión cuando no existe recarga. Se forma a partir de metodologías que relacionan los numerosos fragmentos de recesión entre sí de manera que pueda obtenerse una envolvente principal que configure la CRM. Para su generación se parte de diferentes curvas de recesión para las épocas de estiaje disponibles estableciendo las relaciones entre los fragmentos de recesión, en un proceso denominado concatenación (Nathan y McMahon, 1990). Una vez obtenidos los diferentes segmentos de recesión, el siguiente paso es su ordenación para formar la CRM.

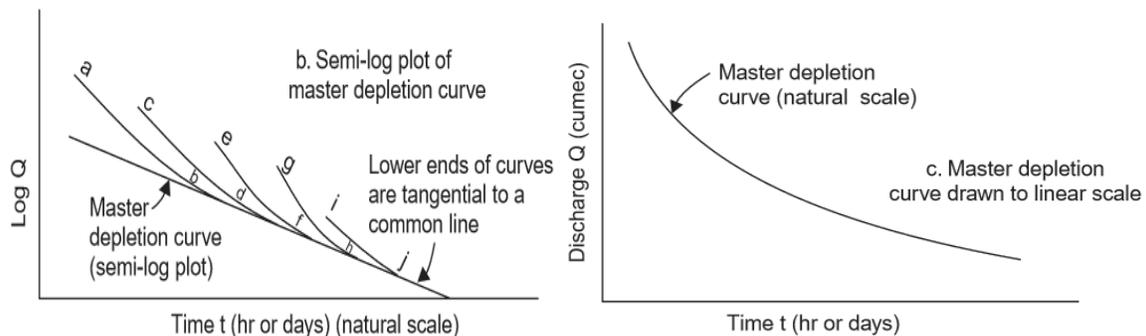


Ilustración 7 Composición de Curva de Recesión Maestra.
Fuente: Raghunath, 2006.

Una vez configurada la curva de concatenación se procede a su ajuste según un modelo lineal o no lineal y la determinación de los principales parámetros que define el modelo de recesión.

3.3.6. Método del filtro recursivo digital

Este método como su nombre lo indica, surge de la aplicación de reglas preestablecidas que son recurrentes en el tiempo, este método busca la obtención de un índice de separación de caudales básicos basado en reglas fácilmente programables. Esta metodología cuenta con dos técnicas de separación de caudales la primera desarrollado por Lyne y Hollick (1979) que proponen una constante α que modifica la forma de la separación.

$$f_k = \alpha f_{k-1} + \frac{1 + \alpha}{2} (y_k - y_{k-1})$$

f_k es el valor filtrado en el k -ésimo momento, y_k es el caudal total en el instante k y α es el parámetro del filtrado. El valor del caudal base se obtiene de la resta de $y_k - f_k$. y α es un valor adimensional que varía según Nathan y McMahon (1990) y Arnold et al. (1995) entre 0.90 y 0.95. sugiriendo el valor promedio de 0.925.

El segundo método es una modificación del anterior propuesto por Eckhardt (2005). Él desarrolló un parámetro de doble filtro asumiendo que el caudal base es linealmente proporcional al almacenamiento y estimando un índice de separación de caudal base máximo.

$$b_t = \frac{(1 - ICB_{max}) * \alpha + b_{t-1} + (1 - \alpha) * ICB_{max} * Q_t}{1 - \alpha * ICB_{max}}$$

b_t es el caudal base filtrado en el instante t , b_{t-1} es el caudal base en el instante $t-1$; ICB_{max} es la relación máxima entre caudal base y caudal total a largo plazo, α es el parámetro de filtrado y Q_t es el caudal total que paso por la sección en el tiempo t .

ICB_{max} es el nuevo parámetro introducido por Eckhardt (2005) a fin de reducir la subjetividad en donde tras varios estudios en diferentes cuencas concluyó que valores de ICB de 0.80 eran representativos para ríos perennes con acuíferos porosos, ICB de 0.50 para ríos efímeros con acuíferos porosos y 0.25 para ríos perennes con acuíferos poco permeables.

3.3.7. Otros métodos

Aunque los métodos gráficos son los más comunes, existen otros métodos, como el empleo de isótopos y otros elementos químicos, según los cuales, los aportes subterráneos en forma de caudal base pueden ser analizados por una gran variedad de elementos químicos y de isótopos, entre ellos $2H$, $3H$, $18O$, Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- . Esta metodología se basa en muestrear la concentración de isótopos en la zona saturada de la orilla y compararla con la concentración existente en el flujo superficial. Cuando ambos valores son iguales, puede admitirse que un alto porcentaje del flujo subterráneo está contribuyendo a la aportación superficial. Por otro lado, si la concentración de isótopos es menor en el cauce que en el

almacenamiento subterráneo, la mayoría del flujo procede de escorrentía directa (Freeze y Cherry, 1979).

La realización de ensayos de este tipo asociados a diferentes configuraciones hidrogeológicas puede ser de gran ayuda en la determinación del ICB de una cuenca. Sin embargo, estos métodos son costosos y requieren un seguimiento continuo para poder extraer conclusiones en términos cuantitativos.

3.4. Separación de caudales base mediante modelos hidrológicos

Modelado Hidrológico: Es un algoritmo que es utilizado para representar sistemas reales y puede ser sustituto del sistema real para ciertos propósitos. El modelo expresa matemáticamente conceptos de sistemas reales (Diskin 1970). Hay muchas maneras de clasificar los modelos matemáticos. Un modelo puede ser, por ejemplo, estático o dinámico, en este sentido Ven Te Chow (1994) los categoriza como modelos físicos o abstractos. Los primeros incluyen modelos a escala que representan el sistema en una escala reducida, los modelos abstractos representan el sistema en forma matemática. La operación del sistema se describe por medio de un conjunto de ecuaciones que relacionan las variables de entrada y de salida, como se muestra en la siguiente ilustración No.8.

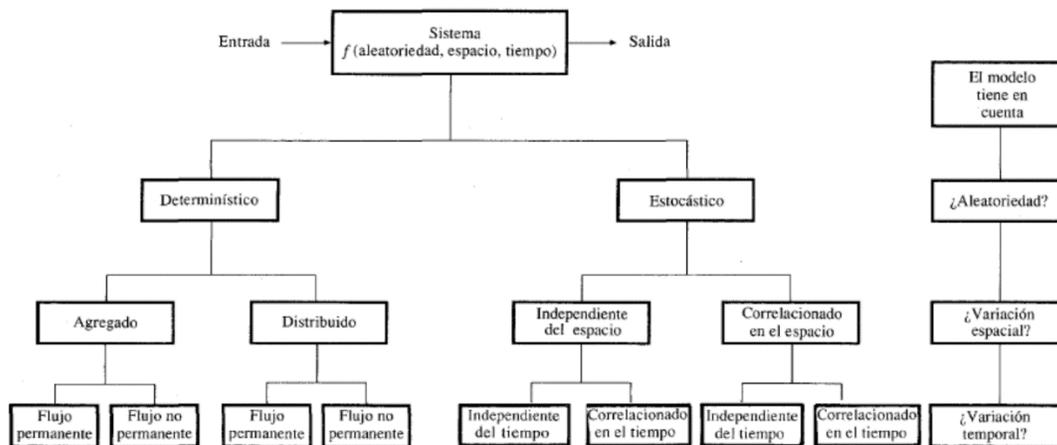


Ilustración 8 Ejemplo de modelo hidrológico.
Fuente: Chow, 1994.

La categoría de los modelos hidrológicos físicos es muy general y abarca muy diversas metodologías. En un extremo están las técnicas de caja negra, puramente empíricas, que no persiguen modelizar la estructura interna, sino solo reproducir los valores de entrada y salida del sistema de cuenca. Una categoría especial de estos modelos son las redes de neuronas artificiales. En el otro extremo están las técnicas basadas en sistemas de ecuaciones complejas obtenidos de leyes físicas y conceptos teóricos que determinan los procesos hidrológicos: los denominados modelos hidrodinámicos (OMM, 1990).

Relación río-acuífero

Dentro de la gama de modelos hidrológicos se debe tener especial cuidado en la selección de modelo a utilizar. Algunos de estos están basados únicamente en conceptos muy generales con respecto a la transformación de los datos de entrada y el hidrograma de salida. Estos pueden llevar a planteamientos inadecuados para la resolución de modelización de cuencas, en las que es necesario evaluar los efectos de la variabilidad del clima y el cambio climático, los cambios de uso de la tierra y la interacción entre los acuíferos y la descarga al río. Por tal sentido, se ha desarrollado un método de modelización que hace uso de estructuras basadas en varios conceptos simplificados de los procesos físicos de la formación del flujo. Los que se conocen como modelos conceptuales de cuencas hidrográficas. De los cuales el modelo HBV así parte y se describe a continuación.

3.4.1. El código Sistema de modelación hidrología integrada (HBV/IHMS)

El modelo hidrológico HBV/IHMS (por sus siglas en inglés) es un modelo conceptual y agregado de precipitación escorrentía ampliamente empleado en previsiones hidrológicas y en estudios de balance hídrico. Pertenece a la clase de modelos que tratan de abarcar los procesos más importantes de generación de escorrentía empleando una estructura simple y robusta, y un pequeño número de parámetros. Fue originariamente desarrollado por el Instituto Meteorológico e Hidrológico Sueco (SMHI) en 1970 (Bergström, 1976; Bergström, 1995). El modelo ha estado sujeto a modificaciones a lo largo del tiempo y, aunque su filosofía básica no ha cambiado, existen nuevos códigos que se encuentran en constante desarrollo por diferentes grupos y que varían en su complejidad. Este modelo describe el balance hídrico general como sigue:

$$P - E - Q = \frac{d}{dt} [SP + SM + UZ + LZ + VL]$$

donde P es la precipitación, E es la evapotranspiración, Q es la escorrentía, SP es el manto de nieve, SM es la humedad del suelo, UZ es la zona superior de agua subterránea, LZ es la zona inferior de agua subterránea y VL es el volumen de los lagos.

El modelo consta de cuatro módulos o rutinas principales: un módulo de fusión y acumulación de nieve, un módulo de humedad del suelo y precipitación efectiva, un módulo de evapotranspiración y por último un módulo de estimación de escorrentía. El modelo puede ejecutarse a escala temporal diaria o mensual. Los datos de entrada necesarios incluyen: series de precipitación y temperatura observadas en cada paso de tiempo y estimaciones a largo plazo de la temperatura y evapotranspiración media mensual.

La ilustración No.9., muestra los procesos generales de la versión utilizada del HBV. Esta incluye un módulo que procesa los datos de precipitación como lluvia o como nieve basándose en la temperatura de cada paso de tiempo.

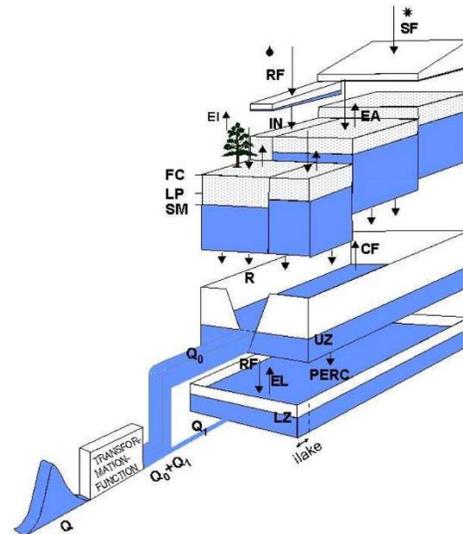


Ilustración 9 Representación esquemática del modelo HBV para una subcuenca.
Fuente: SMHI, 2005.

La lluvia es procesada en el módulo de humedad del suelo donde se evalúa la precipitación efectiva que contribuye a la escorrentía superficial. La parte restante de la precipitación contribuye a la humedad almacenada en el suelo, que a su vez puede evaporarse siempre y cuando el contenido de agua existente en el subsuelo sea lo suficientemente grande. La salida principal del modelo es la escorrentía total en el punto de descarga de la cuenca, que consta de tres componentes: escorrentía superficial, interflujo y flujo base (contribución del flujo subterráneo). El modelo se separa en tres rutinas, las cuales se describe a continuación:

Rutina de lluvia y humedad del suelo

La precipitación caída sobre una cuenca se divide en dos componentes: la primera componente constituye el almacenamiento como humedad en el suelo del agua capilar disponible para evapotranspiración SM , la segunda componente es la infiltración I , la cual contribuye a la escorrentía subterránea. La infiltración es estimada basándose en el contenido de humedad del suelo en el momento en que se produce la precipitación.

Para este proceso se definen dos parámetros: la capacidad de campo FC que es el parámetro que limita el contenido máximo de humedad en el suelo en la zona superficial; y β es un parámetro adimensional que modifica el porcentaje de filtración para el mismo grado de humedad relativa en el suelo. La siguiente ecuación calcula la infiltración en función del contenido existente de humedad del suelo.

$$I_k = \left(\frac{SM_{k-1}}{FC} \right)^\beta P_k$$

Dado un déficit de humedad del suelo (medido por la razón SM/FC), el parámetro β controla la cantidad de agua que contribuye a la escorrentía. La ilustración No.10. muestra

la relación entre la capacidad de campo y el coeficiente de infiltración según el coeficiente de forma β .

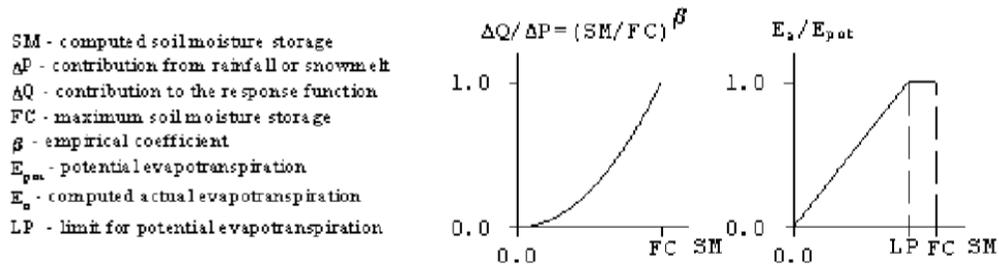


Ilustración 10 Rutina de humedad del suelo.
Fuente: SMHI, 2005.

La evapotranspiración se calcula en base a la humedad en el suelo y la evapotranspiración potencial, de manera que:

$$ETR_k = \begin{cases} ETP_k \left(\frac{SM_t}{PWP} \right)^\beta & SM_k \leq PWP \\ ETR_k = ETR_k & SM_k > PWP \end{cases}$$

ETR y ETP son la evapotranspiración real y potencial, respectivamente, y PWP es el punto de marchitez del suelo, el cual se estima aplicando un factor reductor adimensional LP a la capacidad de campo FC .

Rutina de almacenamiento y escorrentía subsuperficial (escorrentía Rápida)

El flujo subsuperficial se modela mediante dos funciones de descarga. Una descarga rápida Q_0 que se activa cuando el almacenamiento en el suelo SUZ supera un umbral UZL y se define por un parámetro K_0 . Esta descarga rápida se calcula como:

$$Q_{0k} = \begin{cases} K_0(SUZ_{k-1} - UZL), & SUZ_{k-1} > UZL \\ Q_{0k} = 0, & SUZ_{k-1} \leq UZL \end{cases}$$

Mientras que la descarga lenta se calcula según la siguiente expresión:

$$Q_{1t} = K_1 SUZ_{k-1}$$

Siendo, K_1 el parámetro que regula dicha descarga.

En este estrato se tiene una descarga por percolación Q_{perc} que alimenta al estrato de almacenamiento profundo en este caso el acuífero. Esta descarga de percolación se calcula de la siguiente forma:

$$Q_{perc_k} = \begin{cases} \frac{SUZ_{k-1}}{\Delta t_k}, & SUZ_{k-1} \leq PERC * \Delta t_k \\ PERC, & SUZ_{k-1} > PERC * \Delta t_k \end{cases}$$

donde Δt_k es la longitud del intervalo temporal k , y $PERC$ es el caudal máximo de infiltración.

Rutina escorrentía subterráneo (escorrentía lenta)

Para la estimación de la descarga lenta se utiliza un modelo de almacenamiento como en el caso anterior, aunque con un solo parámetro de descarga K_2 , calculando así el drenaje subterráneo Q_2 como:

$$Q_{2k} = k_2 * SLZ_{k-1}$$

Aquí SLZ es almacenamiento subterráneo de agua.

Función de transformación

La escorrentía generada a partir de las rutinas de respuesta se enruta a través de una función de transformación para obtener la forma adecuada del hidrograma en la salida de la cuenca. La función de transformación es una técnica de filtro simple con una distribución triangular de los pesos. Como se muestra en la ilustración No.11.

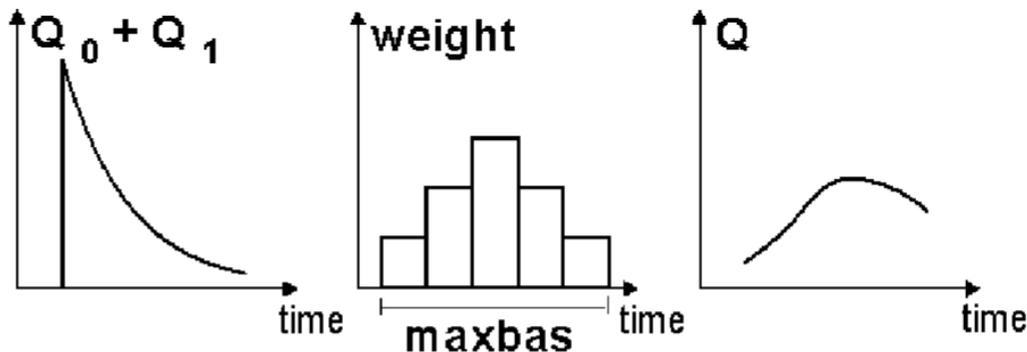


Ilustración 11 Función de transformación.
Fuente: SMHI, 2005.

Calibración y evaluación del modelo

La calibración del modelo es el proceso por el cual los parámetros del modelo van adoptando valores que en su conjunto logran representar el comportamiento hídrico de una cuenca. Consiste, esencialmente en el uso de datos de lluvia-escorrentía tratando de obtener la mejor concordancia en los caudales observados y simulados. Al calibrar, es importante tener un buen método para evaluar los resultados. En el HBV esto se hace principalmente de cuatro maneras diferentes:

- Inspección visual y comparación del hidrograma calculado y observado. Este se puede realizar haciendo comparaciones visuales entre hidrogramas y mediante las curvas de duración respectivas.
- Cálculo de la diferencia acumulada entre la descarga calculada y la observada.

$$Accdif = \sum (Q_C - Q_R) * C_t$$

Donde: Q_C es el caudal simulado, Q_R es el caudal observado, C_t es el coeficiente de transformación de la subcuenca en el instante t .

De igual manera se puede estimar a partir de la diferencia acumulada relativa

$$relacdif = \frac{\sum(QC - QR)}{\sum QR}$$

- Error medio

$$err = \frac{\sum QC}{\sum CR}$$

- Calculando la varianza explicada, R^2 También conocido como coeficiente de eficiencia (E), o coeficiente de Nash Sutcliffe y es una manera de medir el ajuste entre los valores observados y los simulados. El cálculo del coeficiente es en esencia la suma de las desviaciones de las observaciones desde una línea de regresión lineal con pendiente 1.

$$R^2 = \frac{\sum(QR - \overline{QR})^2 - \sum(QC - QR)^2}{\sum(QR - \overline{QR})^2}$$

Donde: \overline{QR} es el caudal medio observado durante el periodo de calibración.

Un modelo perfecto resultaría en un R^2 igual a 1. Sin embargo, normalmente el R^2 termina en algún lugar entre 0,8 y 0,95 a nivel mensual, y disminuye al acortar los pasos de tiempo de la simulación. Este criterio de eficiencia fue introducido por Nash y Sutcliffe (1970) y se usa comúnmente en modelos hidrológicos. A veces se confunde con el grado de determinación, r^2 , que es el cuadrado del coeficiente de correlación.

4. CAPITULO III: DESCRIPCIÓN DEL MEDIO

La superficie de contribución del Río Jicatuyo se ubica entre las coordenadas Long. 361057 – 270013 m.E. y Lat.: 1584245 – 1655490 m.N. (UTM WGS 84), se origina en las estribaciones montañosas de las Cordilleras de Puca u Opalaca, Celaque y Merendón, observándose elevaciones superiores a los 2000 msnm. Se destaca la Montaña de Celaque, en el Cerro de Las Minas, con una elevación de 2849 msnm, siendo el punto más alto del país. En su parte Sur, la cuenca deriva del parteaguas continental, a partir del cual se conforma la Vertiente del Pacífico, formando el vecino Río Lempa. El Río Jicatuyo se forma por la confluencia de los ríos Grande de Mejocote e Higuito. Ambos tributarios se originan en elevaciones superiores a los 2000 msnm, observándose como punto intermedio de las concavidades que forman ambos cursos a 480 msnm, indicando dinámico de sus tramos.

La ilustración No.12., muestra la línea divisoria de la cuenca y los diferentes tributarios que la drenan. Siguiendo la escala de elevaciones inserta, es notorio un cambio de las pendientes del terreno, mucho más marcada en el área del Río Mejocote.

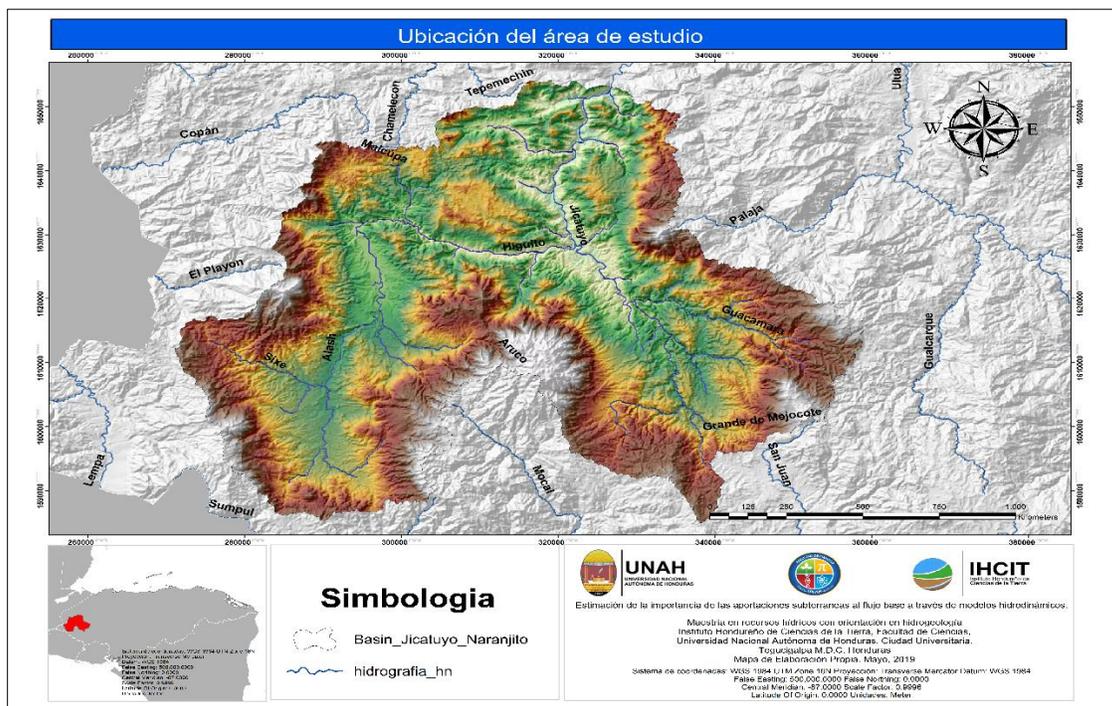


Ilustración 12 Mapa de ubicación del área de estudio
Fuente: Elaboración propia.

4.1. Edafología

Las características físicas más importantes en estudios hidrológicos son: textura, estructura, infiltración, densidad aparente, porosidad y conductividad hidráulica. Cuando no existen valores medidos de ciertos parámetros del suelo, éstos pueden ser estimados basados en las

características físicas de los mismos. El procesamiento de estos datos se refiere por lo general a la obtención de valores medios para toda la cuenca. La ilustración No. 13., siguiente indica los sitios visitados en los cuales se realizaron los muestreos de suelo.

los que posteriormente se identificaron las series de suelos siguiendo la metodología de Simmons (1969),

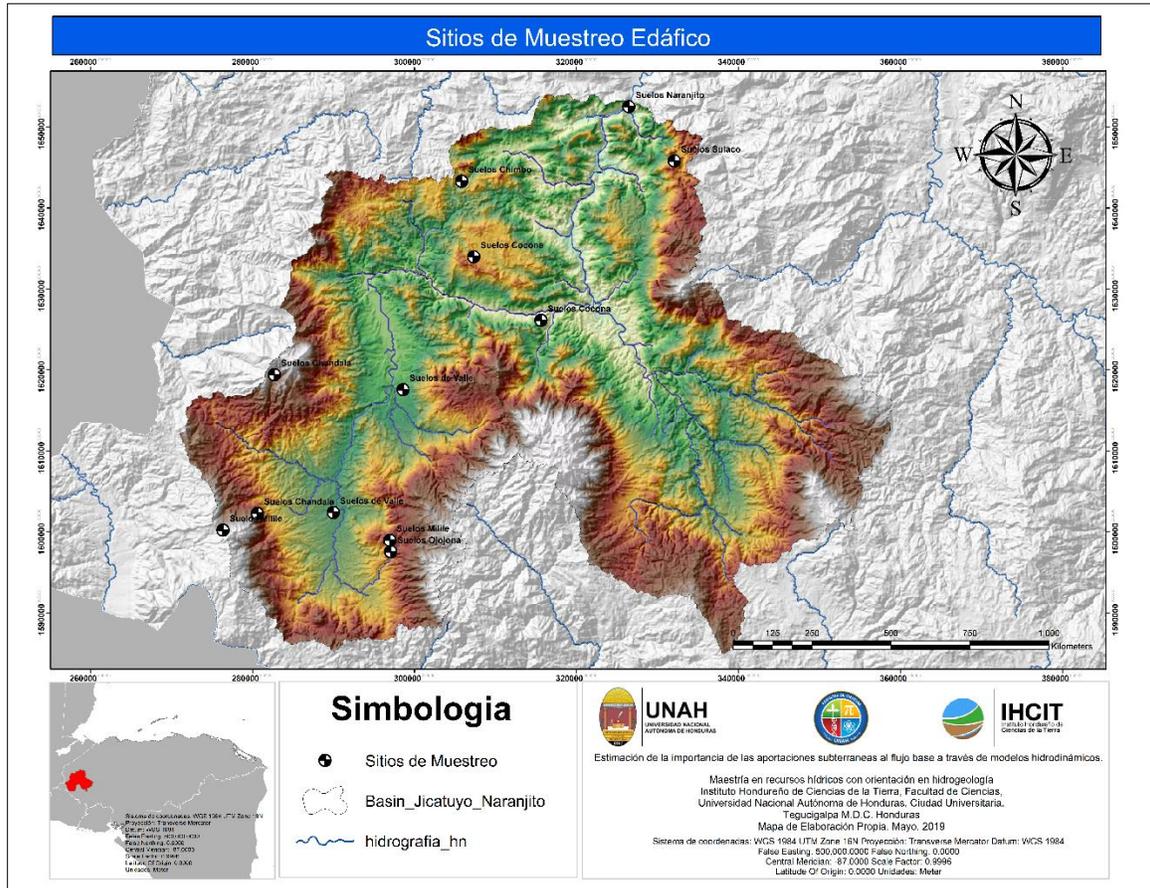


Ilustración 13 Mapa de ubicación de los sitios de muestreo de suelos
Fuente: Elaboración propia

Suelos Chandala

En la cuenca del Río Jicatuyo, los Suelos Chandala, se localizan en los sectores norte, este, oeste y en el centro. Estos suelos en general presentan profundidades medias de 80 – 110 cm, con drenaje moderadamente lento; predominando las texturas finas, consistencias mayormente friables, adherentes y plásticas; estructuras de tipo grano suelto, blocosas angulares y subangulares; son de permeabilidad de moderadamente lenta a permeabilidad moderada; con pocos fragmentos gruesos dentro del perfil. Este tipo de suelo se ha formado a partir de rocas sedimentarias que incluyen principalmente areniscas, conglomerados, lutitas con calizas y, en algunos casos, metamórficas mayormente esquistos sericíticos. Se observan de moderada a fuertemente erosionados; las pendientes se presentan mayores al 15 % y los relieves entre moderadamente ondulados hasta fuertemente escarpados;

presentan poca pedregosidad superficial y también pocos afloramientos rocosos. En la actualidad estos suelos se encuentran cubiertos con pastos naturales, matorrales, cafetales y bosques mixtos.

El siguiente perfil es representativo de esta Serie de suelos y se describió en las coordenadas: 309306 m.E. y 1618208 m.N. (UTM WGS 84), a una altitud aproximada de 1,598 msnm., en las cercanías del sitio denominado Cerro Gacho, a 2.5 kilómetros al noreste de la comunidad de Yaunera. El sitio presenta una pendiente mayor al 30 % y se encuentran actualmente ocupado con pastos y cafetales.



*Ilustración 14 Perfil de Suelo Chandala
Fuente Propia para la investigación.*

- Horizonte 1 0-20 cm. Color pardo rojizo oscuro (5YR 3/3), textura: francosa; estructura: tipo grano suelto; consistencia: muy friable en húmedo, ligeramente adherente y ligeramente plástica en mojado; poros medianos: frecuentes; raíces finas: muchas; raíces medianas: pocas; permeabilidad moderada; sin presencia de fragmentos gruesos dentro de la masa del suelo.
- Horizonte 2 20-40 cm. Color pardo rojizo (5YR 4/3), textura: arcillo arenosa; estructura: tipo blocosa angular débil y pequeña; consistencia: friable en húmedo, adherente y plástica en mojado; poros finos: frecuentes; raíces finas: frecuentes; permeabilidad lenta; sin presencia de fragmentos gruesos dentro de la masa del suelo.
- Horizonte 3 40-90 cm. Color pardo rojizo (5YR 4/4), textura: arcillo arenosa; estructura: tipo blocosa angular débil y pequeña; consistencia: friable en húmedo, adherente y plástica en mojado; poros medianos: frecuentes; permeabilidad lenta; raíces finas: pocas; sin presencia de fragmentos gruesos dentro de la masa del suelo.
- Más de 90 cm. se presenta la roca sedimentaria meteorizada, constituida por arenisca.

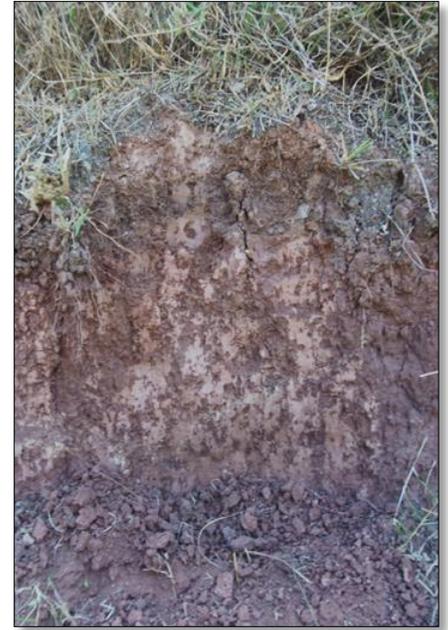
Suelos Chimbo

En la cuenca, los Suelos Chimbo, se localizan, principalmente, en los sectores noroeste, centro y este, con profundidades entre 50 a 100 cm. Se caracterizan por drenaje interno lento, predominando las texturas finas, estructuras de tipo blocosas angulares; son de permeabilidad lenta; consistencias friables a firmes en húmedo y adherentes y plásticas en mojado. Estos suelos se han formado a partir de rocas sedimentarias, mayormente lutitas, conglomerados y areniscas; se observan de moderada a fuertemente erosionados; las pendientes se presentan mayores al 30 %; relieves fuertemente escarpados; con poca pedregosidad superficial principalmente de conglomerados y areniscas rojas.

En la actualidad se encuentran cubiertos con pastos naturales, matorrales y bosques mixtos.

El siguiente perfil es representativo de esta Serie de suelos y se describió en las coordenadas: 305821 m.E. y 1643305 m.N. (UTM WGS 84), a una altitud aproximada de 1,060 msnm., en las cercanías del lugar denominado Cerro El Conal a 3.0 kilómetros al noreste de la comunidad de Dulce Nombre, el sitio presenta una pendiente mayor al 30 % y se haya ocupado mayormente con pastos.

- Horizonte 1: 0-30 cm. Color pardo muy oscuro (7.5 YR2.5/3), textura: arcillo arenosa; estructura: tipo blocosa angular débil pequeña; consistencia: friable en húmedo, adherente y plástica en mojado; poros finos: frecuentes; poros medianos: pocos; raíces finas: muchas, raíces medianas: pocas; permeabilidad lenta; presencia de gravas angulares de conglomerado rojo en un 30 % de la masa del suelo.
- Horizonte 2 3-60 cm. Color pardo rojizo oscuro (5 YR 3/4), textura: arcillo limosa; estructura: tipo blocosa angular débil pequeña; consistencia: firme en húmedo, muy adherente y muy plástica en mojado; poros finos: frecuentes; raíces medianas: muy pocas; permeabilidad lenta; sin presencia de fragmentos gruesos.
- Horizonte 3 60-90 cm. Color pardo (5 YR 4/4), textura: arcillo limosa; estructura: tipo blocosa angular débil mediana; consistencia: firme en húmedo, muy adherente y muy plástica en mojado; poros finos: frecuentes; poros medianos: muy pocos; raíces medianas: muy pocas; permeabilidad lenta; sin presencia de fragmentos gruesos.
- Más 90 cm. Se presenta la roca sedimentaria de conglomerado rojo.



*Ilustración 15 Perfil de suelo Chimbo
Fuente: Propia para la investigación*

Suelos Cocona

En la cuenca, estos suelos se localizan principalmente en los sectores noroeste, centro y sur, en general, con profundidades <50 cm. Presentan un drenaje interno moderado; con texturas moderadamente finas predominantemente, estructuras tipos granulares y blocosas angulares débiles y pequeñas; son de permeabilidad moderada; con muchos fragmentos gruesos dentro del perfil principalmente gravas y piedras de riolita en más del 40 % de la masa del suelo. Los suelos se han formado a partir de rocas volcánicas terciarias ácidas principalmente tobas riolíticas de grano grueso. Se observan de moderada a fuertemente erosionados; las pendientes se presentan mayores al 30 % y los relieves fuertemente escarpados hasta precipicios; presentan mucha pedregosidad superficial y también muchos afloramientos rocosos.



*Ilustración 16 Perfil de suelo Cocona
Fuente: Propia para la investigación*

El siguiente perfil es representativo de esta Serie de suelos y se describió en las coordenadas 328887 m.E. y 1621923 m.N. (UTM WGS 84), a una altitud aproximada de 886 msnm., un kilómetro al noroeste de la Comunidad de San José del Alto, el sitio presenta una pendiente superior al 30% y está ocupado con pastos y matorrales.

- Horizonte 1: 0-17 cm. Color pardo negro (10YR2/1), textura: franco arcillosa; estructura: tipo grano suelto; consistencia: muy friable en húmedo, adherente y plástica en mojado; poros finos: frecuentes; raíces finas: muchas; raíces medianas: pocas; permeabilidad: moderada a lenta; presencia de gravas angulares de riolitas en más del 40 % de la masa del suelo.
- Horizonte 2 17-43 cm. Color gris (7.5YR 5/1), textura: franco arcillo limosa; estructura: tipo blocosa angular débil pequeña; consistencia: muy friable en húmedo, adherente y plástica en mojado; poros finos: frecuentes; raíces medianas: pocas; permeabilidad lenta; presencia de gravas y piedras angulares de riolitas en más del 40 % de la masa del suelo.
- Más de 43 cm. Se presenta la roca volcánica parcialmente meteorizada, constituida por riolita meteorizada de color rosáceo.

Suelos Milile

Estos suelos se localizan en los sectores sur, suroeste y sureste de la cuenca, se consideran como suelos de altura, pues comúnmente se encuentran en altitudes mayores a los 1,300 msnm. En general son de moderadamente profundos a profundos, moderadamente bien drenados, moderadamente erosionados, con texturas moderadamente finas y finas predominantemente, estructuras de tipos grano suelto y blocosas angulares, consistencias friables adherentes y plásticas, pendientes mayores al 30 %, relieve ondulado hasta fuertemente escarpado y montañoso, con pocas piedras en la superficie y sin afloramientos rocosos, desarrollados sobre cenizas volcánicas no consolidadas, ocupados con cultivos de café, pastos, bosque latifoliado y bosque mixto.

El siguiente perfil es representativo de esta Serie de suelos y se describió en las coordenadas 296967 m.E. y 1598968 m.N. (UTM WGS 84), a una altitud aproximada de 1,409 msnm., en el sitio denominado El Naranjo, 3.5 kilómetros al noreste de la comunidad de Mesa Grande; el sitio presenta una pendiente del 15 % y se haya ocupado con cultivos de café y pastos; presenta, además, poca pedregosidad superficial.



*Ilustración 17 Perfil de suelo Milile
Fuente: Propia para la investigación*

- Horizonte 1 0-12 cm. Color pardo amarillento oscuro (10 YR 3/6), textura: franco arcillosa; estructura: tipo grano suelto; consistencia: friable en húmedo, adherente y

- plástica en mojado; poros finos: frecuentes, raíces finas: muchas; raíces medianas: pocas; permeabilidad: moderada a lenta; sin presencia de fragmentos gruesos.
- Horizonte 2 12-23 cm. Color pardo intenso (10 YR 4/6), textura: franco arcillo limosa arcillosa; estructura: tipo blocosa angular pequeña y débil; consistencia: friable en húmedo, adherente y plástica en mojado; poros finos: frecuentes; raíces finas: pocas y permeabilidad: lenta.
- Horizonte 3 23-70 cm. Color rojo amarillento (5 YR 4/6); textura: arcillosa, estructura: tipo blocosa angular pequeña y fuerte; consistencia: firme en húmedo, muy adherente y muy plástica en mojado; poros finos: frecuentes; permeabilidad: lenta.
- Más de 70 cm. se observan las cenizas volcánicas no consolidadas de color rojizo amarillento.

Suelos Naranjito

En la cuenca del Río Jicatuyo, estos suelos se localizan principalmente en el sector norte. Generalmente son moderadamente profundos, moderadamente bien drenados, de texturas moderadamente finas predominantemente, estructuras tipos granulares y blocosas angulares débiles y pequeñas; son de permeabilidad moderada lenta; con muchos fragmentos gruesos dentro del perfil, principalmente gravas y piedras de lutitas amarillas en más del 40 % de la masa del suelo. Se han formado a partir de rocas sedimentarias, principalmente lutitas amarillas y conglomerados de color claro. Se observan de moderada a fuertemente erosionados; las pendientes se presentan mayores al 30 % y los relieves fuertemente escarpados; presentan poca pedregosidad superficial y pocos afloramientos rocosos.

El siguiente perfil es representativo de esta Serie de suelos y se describió en las coordenadas 326470 m.E. y 1652514 m.N. (UTM WGS 84), a una altitud aproximada de 429 msnm., en el sitio denominado cerro La Cebadilla, 4 kilómetros al sur de la Comunidad de Santiago de Posta; el sitio presenta una pendiente superior al 30% y está ocupado con pastos y matorrales.



*Ilustración 18 perfil de suelo Naranjito
Fuente: Propia para la investigación*

- Horizonte 1 0-24 cm. Color pardo muy oscuro (10 YR 2/2; textura: franco arcillosa; estructura: tipo grano suelto; consistencia: friable, adherente y plástica; poros finos: frecuentes; permeabilidad: moderadamente lenta; raíces finas y muy finas: muchas; sin fragmentos gruesos.
- Horizonte 2 24-60 cm. Color pardo intenso (7.5YR 4/6), textura: arcillo arenosa; estructura: tipo blocosa angular débil y pequeña; consistencia: friable, adherente y plástica; poros finos: frecuentes; raíces finas y medianas: pocas; con pocos fragmentos gruesos.
- Más de 60 cm. Se presenta el material parental constituido por lutitas de color amarillo.

Suelos Ojojona

Los suelos Ojojona en la cuenca del Río Jicatuyo se localizan principalmente en los sectores suroeste, sureste y centro, con profundidades <50 cm. Son moderadamente bien drenados; predominando las texturas moderadamente finas; estructuras de tipo grano suelto y blocosas angulares mayormente; observan una permeabilidad moderadamente lenta; en algunos casos con presencia de fragmentos gruesos dentro del perfil, principalmente gravas y piedras de formas angulares, en más del 40 % de la masa del suelo. Se han formados a partir de materiales volcánicos terciarios ácidos, especialmente ignimbritas de grano fino.

Se observan severamente erosionados; las pendientes se presentan mayores al 15 % y los relieves se encuentran entre ligeramente ondulados hasta montañosos; en la mayoría de los casos muestran mucha pedregosidad superficial y afloramientos rocosos. En la actualidad se encuentran cubiertos con bosques de pino, bosque mixto, matorrales y pastos.



Ilustración 19 Perfil de suelo Ojojona Fuente: propia para la investigación

El siguiente perfil es representativo de esta Serie de suelos y se describió en las coordenadas 397081 m.E. y 1597549 m.N. (UTM WGS 84), a una altitud aproximada de 1,311 msnm., en el sitio denominado Río Colorado, un kilómetro al oeste de la comunidad de El Granizal; el sitio presenta una pendiente mayor al 30 % y se haya ocupado con bosque de pino denso.

- Horizonte 1 0-8 cm. Color negro (10YR2/1), textura: franco arcillosa; estructura: tipo grano suelto; consistencia: friable en húmedo, adherente y plástica en mojado; poros finos: frecuentes; raíces finas: muchas; raíces medianas: pocas; permeabilidad: moderadamente lenta; sin presencia de fragmentos gruesos en la masa del suelo.
- Horizonte 2 8-18 cm. Color pardo muy oscuro (10 YR 2/2); textura: franco arcillosa; estructura: tipo blocosa angular débil pequeña; consistencia: friable en húmedo, adherente y plástica en mojado; poros finos: frecuentes, raíces finas: pocas y permeabilidad: moderadamente lenta.
- Más de 18 cm., se observa la roca volcánica consolidada, constituida por ignimbrita de grano fino.

Suelos Sulaco

Estos suelos se localizan principalmente en los sector este de la zona de estudio; con profundidades medias entre 50 a 100 cm. Drenaje interno moderadamente lento, de texturas finas y moderadamente finas predominantemente, estructuras tipo blocosas angulares, son de permeabilidad moderadamente lenta, con fragmentos gruesos principalmente gravas de caliza dentro del perfil, en más del 40 %; de moderado a severamente erosionados, teniendo como material parental rocas calcáreas principalmente calizas. Presentan un relieve de ondulado a fuertemente escarpado con pendientes mayores al 15 % y con muchos afloramientos rocosos y mucha pedregosidad superficial. En la actualidad están cubiertos con pastos naturales, matorrales y algunas áreas con cultivos de granos básicos y cafetales.



*Ilustración 20 Perfil de suelo Sulaco
Fuente: Propia para la investigación*

El siguiente perfil se observó y describió en un paredón, ubicado en las coordenadas UTM 332089 m.E. y 1645816 m.N. (UTM WGS 84), a una altitud de 1,153 msnm., un kilómetro al suroeste de la comunidad de La Jagua, el sitio presenta un pendiente promedio del 20 %, y se encuentra cubierto con cultivo de café.

- Horizonte 1 0-30 cm. Color pardo muy oscuro (10 YR 2/2), textura: franco arcilloso; estructura: tipo blocosa angular, débil y pequeña; consistencia: friable en húmedo, adherente y plástica en mojado; poros finos: frecuentes; raíces muy finas y finas: muchas; raíces medianas: pocas; permeabilidad: moderadamente lenta; presencia de gravas angulares de calizas en más del 40 % de la masa del suelo.
- Horizonte 2 30-60 cm. Color pardo amarillento oscuro (10 YR3/6), textura: arcillosa; estructura: tipo blocosa angular mediana fuerte, consistencia firme en húmedo, muy adherente y muy plástica en mojado; poros finos: frecuentes; raíces medianas: pocas y permeabilidad lenta; presencia de gravas angulares de calizas en más del 40 % de la masa del suelo.
- Más de 60 cm. Se presenta la roca caliza fracturada.

Suelos de Valle

Estos suelos corresponden a todos los valles comprendidos dentro de la cuenca de Río Jicatuyo, que incluye, entre otros, los valles de Gracias, Cucuyagua y Sensenti, que comprenden llanuras aluviales, planos de inundación, terrazas y coluviones, con profundidades > 100 cm. Presentan un drenaje desde moderado hasta excesivamente drenados; presentan diversas clases texturales, incluyendo desde gravas y piedras, hasta muy finas, diversos tipos de estructuras; su permeabilidad va desde muy lenta hasta rápida; pudiendo presentar o no fragmentos gruesos dentro del perfil. Estos suelos se han formado a partir de sedimentos aluviales cuaternarios o más recientes, provenientes de diferentes tipos de rocas, principalmente sedimentarias y volcánicas. Se observan de ligera a moderadamente erosionados; las pendientes oscilan entre los rangos 0 – 15 % y los relieves entre planos a moderadamente ondulados; en algunos casos pueden presentar pedregosidad superficial y afloramientos rocosos. En la actualidad se encuentran cubiertos con pastos, centros poblados, cultivos de granos básicos y matorrales.



*Ilustración 21 Perfil de suelos de los Valles
Fuente: Propia para la investigación*

El siguiente perfil se observó y describió en el valle de Cucuyagua, ubicado en las coordenadas 298601m. E. y 1617568m. N. (UTM WGS 84), a una altitud de 835 msnm., un kilómetro al noroeste de la comunidad de San Pedro de Copán; el sitio presenta un pendiente promedio del 3 %, correspondiendo a un plano aluvial antiguo y se encuentra cubierto con pastos naturales y matorrales.

- Horizonte 1 0-20 cm. Color pardo muy oscuro (10 YR 2/2), textura: franco arcillosa; estructura: de tipo blocosa angular débil y pequeña; consistencia: friable en húmedo, adherente y plástica en mojado; poros finos: frecuentes; raíces finas: muchas; raíces medianas: pocas; permeabilidad: moderadamente lenta.
- Horizonte 2 20-50 cm. Color pardo oscuro (10 YR 3/3), textura: franco arcilloso; sin estructura, consistencia: friable en húmedo, adherente y plástica en mojado; poros finos: muchos; raíces medianas: pocas; permeabilidad: moderadamente lenta.
- Horizonte 3 50-110 cm. Color pardo grisáceo oscuro (10 YR 4/3), textura: franco arcilloso; estructura: de tipo blocosa angular débil y pequeña, consistencia: friable en húmedo, adherente y plástica en mojado; poros finos: muchos; permeabilidad: moderadamente lenta; con presencia de fragmentos gruesos mayormente piedras y gravas en más del 40 % de la masa del suelo.

La tabla No.1., resume algunas características físicas de los suelos encontrados y la ilustración No. 22., muestra la distribución espacial dentro de la subcuenca de los diferentes tipos de suelos.

Tabla 1 Características físicas de los suelos encontrados en la subcuenca

Serie de Suelos	Clasificación Hidrológica	Profundidad cm.	Clase Textural	Porosidad %	Porosidad Efectiva %	Cabeza de Succión cm.	Conductividad Hidráulica cm./hora
1.Chandala	C	0-20	F	0.463	0.434	8.89	0.34
		20-40	AAr	0.43	0.321	23.9	0.06
		40-90	AAr	0.43	0.321	23.9	0.06
		Más de 90	Roca				
2.Chimbo	C	0-30	AAr	0.43	0.321	23.9	0.06
		30-60	AL	0.479	0.423	29.22	0.05
		60-90	AL	0.479	0.423	29.22	0.05
		Más de 90	Roca				
3.Cocona	C	0-17	FA	0.464	0.309	20.88	0.1
		17-43	FA	0.464	0.309	20.88	0.1
		Más de 43	Roca				
4. Milile	B	0-12	FA	0.464	0.309	20.88	0.1
		23-Dec	FAL	0.471	0.432	27.3	0.1
		23-70	A	0.475	0.385	31.63	0.03
		Más de 70	Roca				
5. Naranjito	C	0-24	FA	0.464	0.309	20.88	0.1
		24-60	AAr	0.43	0.321	23.9	0.06
		Más de 60	Roca				
6. Ojojona	C	0-08	FA	0.464	0.309	20.88	0.1
		18-Aug	FA	0.464	0.309	20.88	0.1
		Más de 18	Roca				
7. Sulaco	C	0-30	FA	0.464	0.309	20.88	0.1
		30-60	AL	0.479	0.423	29.22	0.05
		Más de 60	Roca				
8. Suelos de Valle	C	0-20	FA	0.464	0.309	20.88	0.1
		20-50	FA	0.464	0.309	20.88	0.1
		50-110	FA	0.464	0.309	20.88	0.1

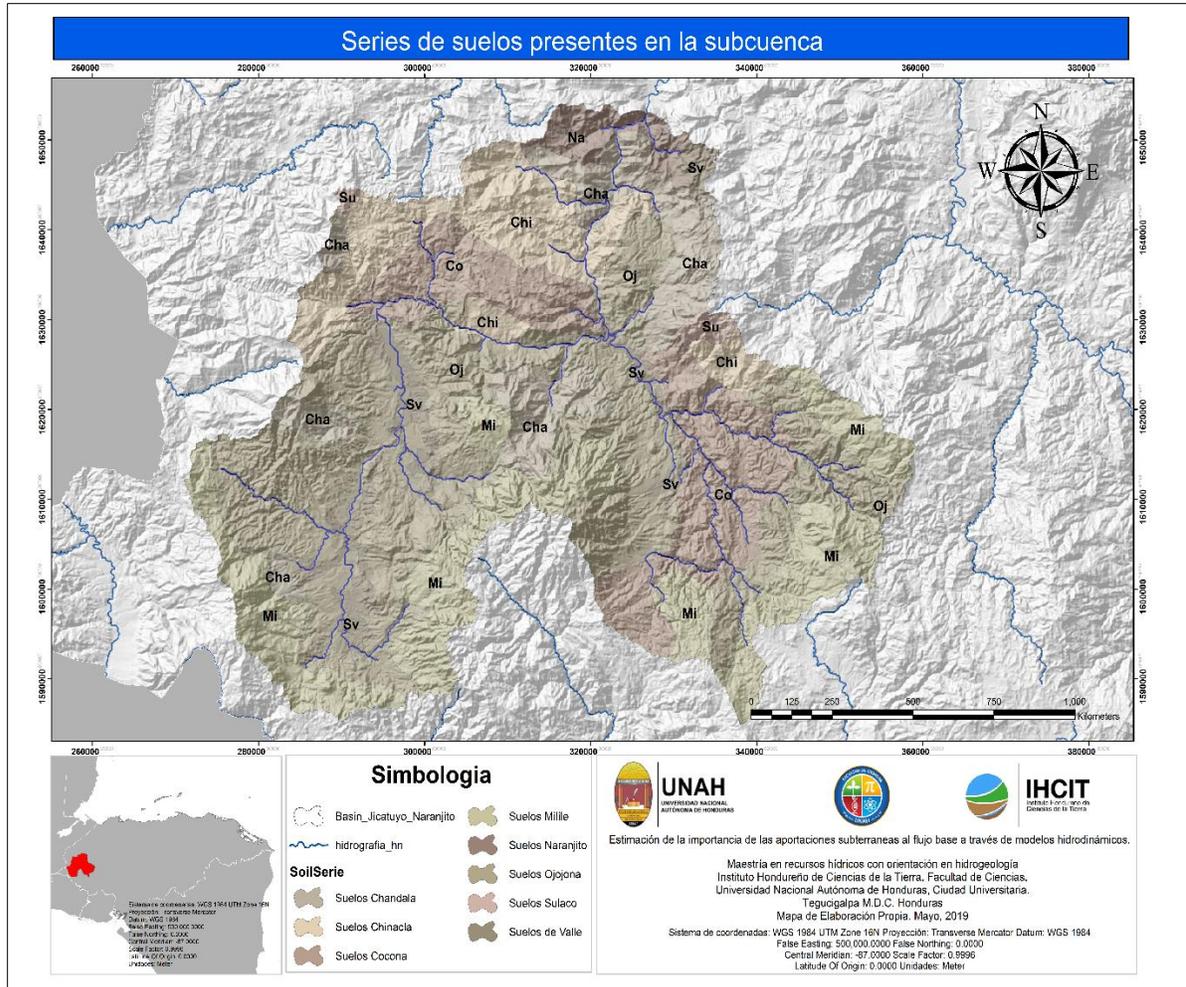


Ilustración 22 Mapa de series de suelos según clasificación de Simmons
Fuente: Elaboración Propia a partir de mapa de suelos FAO, 1969

4.2. Geología

De acuerdo con los estudios geológicos en el país realizados por Rogers, R.D., (1992) y SERNA, GEOMINH-BRGM, (1987-1992), donde plasmaron en diferentes hojas geológicas los estratos litológicos presentes en el país. La subcuenca del Río Jicatuyo presenta 5 formaciones litológicas siendo la formación Valle de Ángeles la cual cubre la mayor área de esta (2870 km²). A continuación, se describen los diferentes grupos encontrados.

Grupo Valle de Ángeles

Rocas sedimentarias cretácicas de la Formación Valle de Ángeles (Kva) compuesto por conglomerados, areniscas, margas y calizas. Está dividido en Capas Rojas Superiores y Capas Rojas Inferiores, separadas por formaciones de calizas.

Grupo Padre Miguel

Rocas volcánicas del terciario Padre Miguel (Tpm) extendido al conjunto de los depósitos volcánicos ácidos de Centro América del Oligoceno y Mioceno, con erupciones

entre 20 y 9 millones de años (Harwood,R., 1993). Este episodio probablemente estuvo relacionado con la fusión parcial de la corteza continental bajo la zona (Rogers, R.B., et al, 2002). Consiste en un grupo de ignimbritas, tobas riolíticas, y tobas andesíticas

Rocas Intrusivas

Rocas intrusivas del Cretácico terciario (Kti). Principalmente granito se presenta en bolones de grandes dimensiones entre el resto de la roca alterada lo que da origen a un material arenoso (saprolitas) y se hallan en contacto con las rocas volcánicas del Grupo Padre Miguel.

Grupo Yojoa

Rocas sedimentarias del Grupo Yojoa (Ky). Son calizas estratificadas de color gris oscuro a negras de grano fino y con fósiles de orbitolinides, las calizas no son fértidas, son plegadas y los estratos tienen de 8 a 20 cm. De espesor con intercalaciones de capas delgadas de lutitas grises.

Formación Gracias

Formación Gracias (Tg) de arenas y lutitas, a finales del Terciario se produce un levantamiento global del “Bloque Chortis”, que provoca la erosión de los materiales descritos. Los productos de esta erosión fueron transportados y sedimentados en cuencas interiores, principalmente en las zonas de graben.

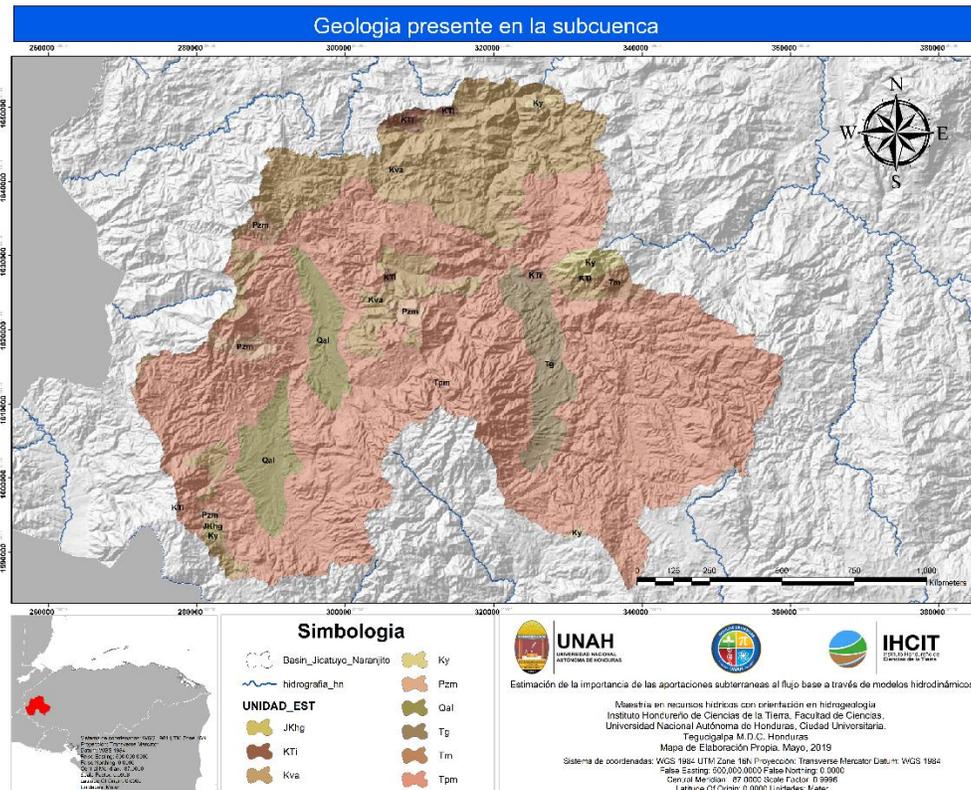


Ilustración 23 Mapa geológico de la subcuenca

Fuente: Elaboración propia a partir del Mapa geológico nacional, 1991 SINIT(Sistema Nacional de Información Ambiental)

4.3.Hidrografía

El tramo de control que se investiga comprende las estrechuras del cauce en las vecindades del poblado de Santiago de Posta, en el departamento de Santa Bárbara, hasta donde despliega una longitud de 140 kilómetros desde el punto más lejano de su cuenca. Aproximadamente, se observa una pendiente media de 0.007 m/m.

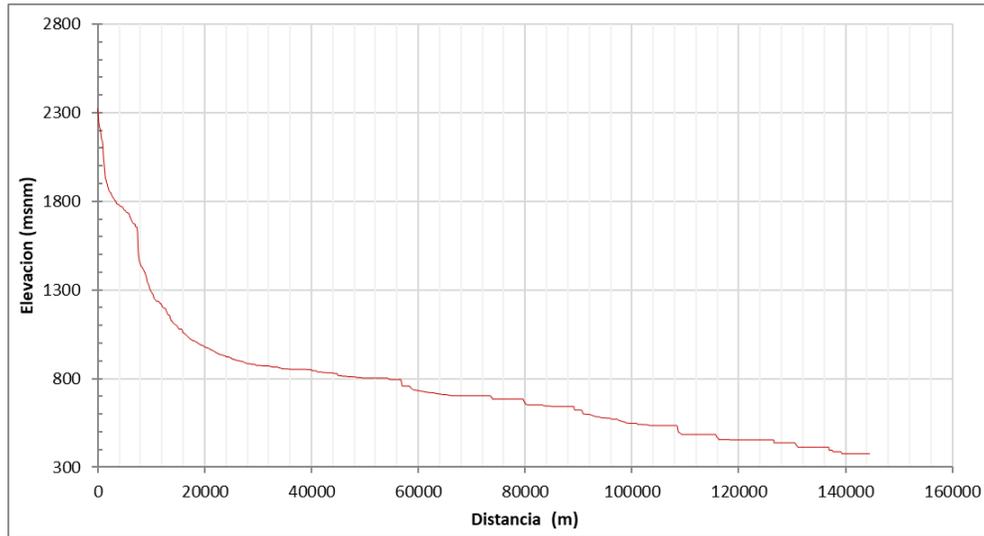


Gráfico 2 Perfil longitudinal de la corriente principal del Río Jicatuyo

Fuente: Elaboración propia

En muchas zonas los tiempos de concentración de las aguas hacia el cauce son rápidas, dado la ausencia forestal y la consecuente pérdida de suelo; en algunos sitios es común observar el material parental, condición que favorece la escorrentía rápida y la propagación de picos de crecida altos cuando las lluvias son intensas y de apreciable duración.

Esta subcuenca cuenta con un área de 3520 kilómetros, perímetro 466 km y una densidad de drenaje (metodología Chow, 1964) de 0.22 km/km² lo que se considera una densidad de drenaje baja. El índice de Gravelius (metodología Magette, 1976) de 2.6 indica que la cuenca se puede considerar rectangular con un factor de forma (metodología Magette, 1976) de 0.22. Estos parámetros se ven reflejados en el tiempo de concentración, en donde el índice de compacidad de Gravelius y el factor de forma reflejan una menor susceptibilidad a mayores crecientes que cuencas más circulares. La densidad de drenaje se considera baja, lo cual representa mayor tiempo de concentración, lo que permite que la precipitación se infiltre disminuyendo la escorrentía superficial. De igual manera la densidad de drenaje se asocia a la capacidad erosiva en donde en este caso como es de esperar se identifica con relieves montañosos con suelos resistentes a la erosión.

Adicionalmente a las características morfométricas, el gráfico No.3., muestra la curva hipsométrica. Se puede observar que la elevación media de la cuenca es aproximadamente 1160 msnm, considerándose como una cuenca con poca erosión fluvial (de acuerdo a metodología en Chow, 1964)

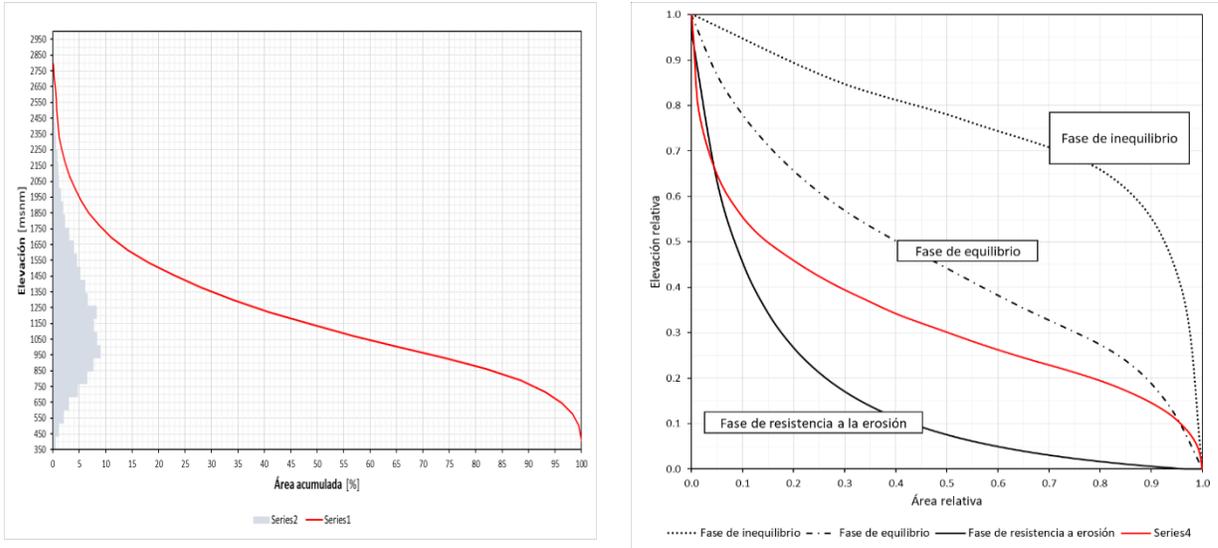


Gráfico 3 Histograma de frecuencias altitudinales (izquierda), gráfico de equilibrio sedimentario (derecha)
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2 Resumen de la Características morfométricas más relevantes de la subcuenca

<i>Superficie de aportación [km²]</i>	<i>Longitud del tributario mayor [km]</i>	<i>Pendiente media del tributario mayor [m/m]</i>	<i>Tiempo de concentración [hr]</i>
3520	140	0.007	18.88

4.4. Cobertura vegetal

Posterior al desarrollo de giras de campo, a continuación, se describen las principales coberturas vegetales, así como su ubicación espacial, extensión y su porcentaje del área total en la cuenca (ver ilustración No. 24).

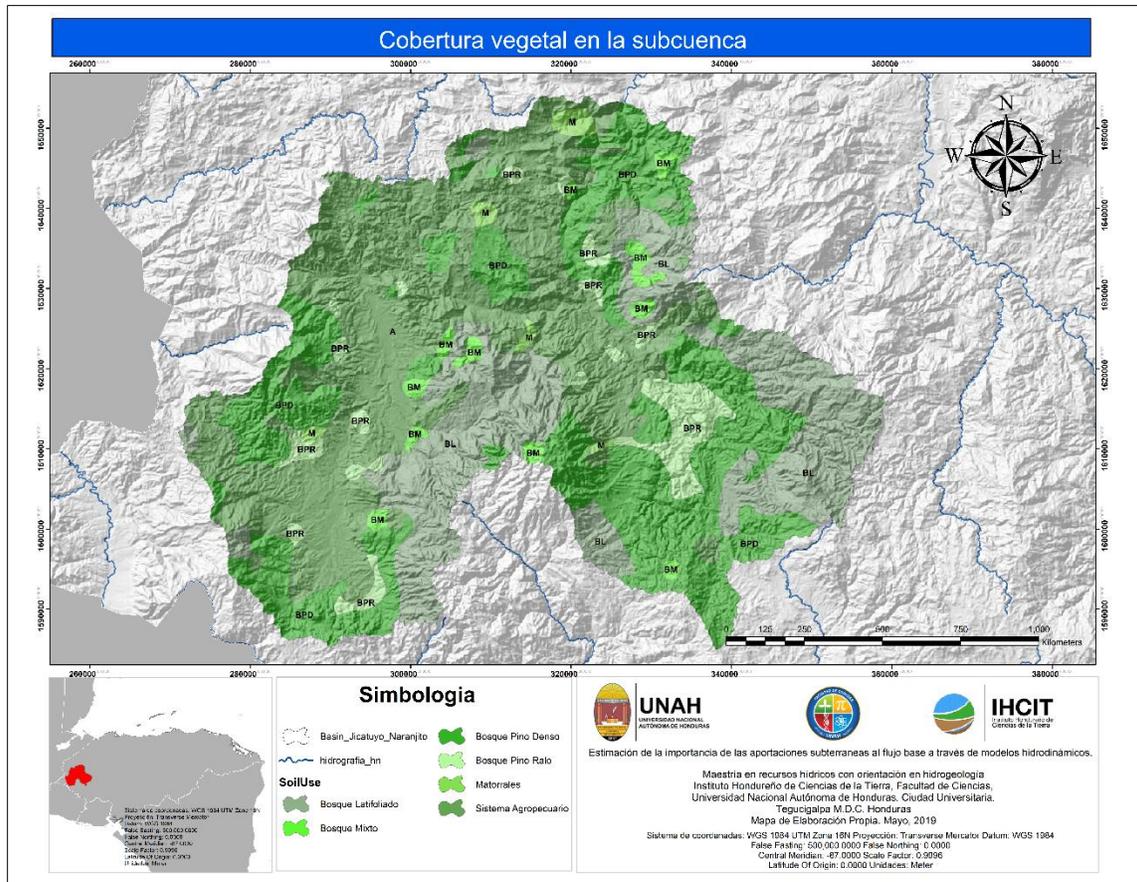


Ilustración 24 Mapa de cobertura vegetal
Fuente: Propia para la investigación

Matorrales

Esta categoría se caracteriza por estar formado de especies arbustivas secundarias, considerándose como un tipo de bosque en generación natural o de recuperación, que se desarrolla después de haber despojado de la cubierta vegetal a un bosque latifoliado primario o mixto, predominante latifoliado. Se localizan sobre suelos que han sido dejados en reposo o abandonados después de ser aprovechados por actividades agropecuarias.

Se puede observar especies del bosque original que no fueron cortadas, apareciendo en pequeños rodales o individuos aislados. También este tipo de cobertura se observa en parcelas que fueron trabajadas en cultivos, posteriormente como áreas de pastoreo y, finalmente, fueron abandonadas, creciendo con el tiempo un matorral alto. Por lo general, esta unidad, también se encuentra combinada con pastos naturales.

Bosque Latifoliado

En esta categoría se consideran todas las especies arbóreas de hoja ancha. Los bosques dentro de esta categoría están constituidos normalmente cuando se encuentran en estado primario, o secundario con un buen período de recuperación, por algunos árboles que producen maderas de color de muy buena calidad, así como los helechos arborecentes. Los doseles de estos bosques presentan una excelente cobertura y además sus troncos y ramas albergan a varios tipos de epífitas (gallitos), helechos y orquídeas, mejorando, de

esta forma, la cobertura y el coeficiente de intercepción de la lluvia. Por otra parte, la cantidad de hojarasca que se acumula en estos bosques es moderada y poca profunda, asociada a una buena profundidad de suelo o material parental muy alterado, presentando, por consiguiente, una buena condición hidrológica.

Comprende especies de tamaño arbóreo, especies arbustivas y bejucos, así como también diferentes tipos de palmeras y helechos, presentan un epifitismo fuerte con árboles cubiertos por bromelias, orquídeas, aráceas, helechos, musgos, lianas; otra característica de esta comunidad vegetal es la presencia de helechos arborescentes, entre las diferentes especies vegetales que se pueden observar con mayor frecuencia tenemos: Roble de montaña (*Quercus skinneri*), Moquillo (*Saurauria* sp), Guamas (*Inga* spp), utilizado para sombra del café, oreja de burro (*Clusia* sp), y liquidámbar (*Liquidámbar esteressaflua*).

Bosque de Pino Denso

Esta categoría se presenta cuando la cobertura boscosa por especies acícula-foliadas es mayor al 40 %. Son áreas de bosque dominadas por pino en diferentes estados de madurez (regeneración, joven, medio, maduro, ralo). La mayoría de éstos está destinada a la producción forestal bajo los lineamientos de planes de manejo.

Se presenta en varias zonas del área de estudio, las especies que sobresalen son dos especies de pino, siendo éstos el *Pinus Pseudoestrobis* y el *Pinus Oocarpa*, teniendo como sotobosque especies de hoja ancha que incluye encinos de diferentes especies, nances, robles, zarzas y moras.

Bosque de Pino Ralo

Este tipo de cobertura es común encontrarla en suelos de régimen ústico (i.e, que el régimen de humedad se encuentra limitado, pero esa humedad está presente cuando existe condiciones favorables para el crecimiento de las plantas), que pasa la mayor parte del tiempo seco y es producto de bosques de pino sometidos a un manejo forestal, donde la cobertura es baja, permitiendo la penetración de luz solar para dar paso al desarrollo de las gramíneas. Esta categoría a diferencia de la anterior esta asociación a una cobertura boscosa menor al 40%. El grado de protección al suelo que puede proporcionar esta asociación depende de los antecedentes de los incendios forestales que se presentan en la zona en estudio, siendo mala cuando la frecuencia de incendios es elevada, y regular en el caso contrario.

Se presenta en varias zonas del área de estudio, las especies que sobresalen es el pino ocote (*Pinus oocarpa*); tiene como sotobosque especies de hoja ancha que incluye encinos de diferentes especies, nances, robles, quebracho, chaparro, zarzas y moras.

Bosque Mixto

Son áreas en donde se encuentra una combinación del pino con especies de hoja ancha como robles, encinos, nance de montaña y liquidámbar, predominando el pino sobre las especies de hoja ancha, pero también se puede presentar el caso en donde predominan las especies de hoja ancha sobre las especies de coníferas. Entre las especies dominantes, en este caso, están el liquidámbar y especies de encino.

Sistema Agropecuario

Esta categoría incluye aquellas áreas con intervención antropogénicas relacionadas con la agricultura y ganadería (sistema agropecuario), en las que se observan tierras sembradas con cultivos de maíz, frijol, cafetales y pastos naturales y cultivados, empleando variedad de procesos a diversos niveles tecnológicos. Se ha empleado esta categoría general, debido a lo extenso de la cuenca, ya que es muy difícil separar ambas categorías en un mapa a la escala determinada (1:250,000). Por lo general, es difícil separar los matorrales de los pastos, porque casi siempre ambos se encuentran combinados. Esta combinación pastos/matorrales son el resultado de la deforestación del bosque original para el establecimiento de cultivos anuales en primer lugar, que, posteriormente, debido posiblemente a la reducción de la fertilidad natural de los suelos, son abandonados, dejándolos que se revegeten naturalmente. Sin embargo, en el ínterin de esta acción natural, se pierde una lámina de suelo, mayor cuando incrementa la pendiente del terreno.

Por lo general, esta combinación incluye pastos naturales con especies arbustivas de segundo crecimiento, incluyendo también algunos especímenes del bosque original.

4.5. Variabilidad climatológica

El clima, y con éste su distribución pluvial, en la cuenca de Río Jicatuyo, están condicionados por la circulación de los Vientos Alisios del sureste, la exposición y orientación de las formaciones montañosas de la Sierra Gallinero, al suroeste, la Montaña de Celaque y las estribaciones de la Cordillera de Puca u Opalaca, al sur y sureste, respectivamente.

La subcuenca del Río Jicatuyo observa dos períodos: una Estación Lluviosa y una Estación Seca. La primera da inicio a mediados del mes de mayo y se extiende hasta mediados del mes de noviembre, con el avance estacional anual de la Zona Intertropical de Convergencia de los Vientos Alisios (ITCZ), hacia nuestras latitudes, estación que se ve reforzada por el paso continuo de ondas tropicales que cruzan el país de este a oeste. La influencia de la ITCZ posteriormente observa una merma en sus aportes pluviales desde mediados de julio hasta mediados de agosto, conocido como “canícula”. La Estación Seca se manifiesta posteriormente con el arribo de los frentes fríos y las masas de aire seco extratropical.

Debido a lo anterior, el clima de la subcuenca se clasifica, según clasificación de Köppen y ajustado para Honduras por Edgardo Zúñiga (1989), como un clima lluvioso de altura (Vx) con interrupciones en ciertas zonas donde predomina un clima lluvioso con inviernos muy secos (Vb). Esto se puede observar en los registros pluviométricos de las Estaciones Hidrometeorológicas Principales (HMP) en la región, Santa Rosa de Copán (1083 msnm) y La Esperanza (1674 msnm) ambas propiedades del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y ahora parte CENAOS/COPECO, ubicadas en los departamentos de Copán e Intibucá. Ambas estaciones muestran que durante junio y septiembre constituyen los meses de mayor aporte pluvial, lo cual se observa en la tabla No.3. Adicionalmente los promedios mensuales para la temperatura y humedad se resumen en las tablas No.4 y 5.

Tabla 3 Registros de Precipitación medios mensuales de las estaciones La esperanza y Sanata Rosa

Registros Medios Mensuales de la Precipitación [mm]													
Estación	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	Promedio
La Esperanza	185.8	259.0	146.8	201.2	273.2	160.8	31.2	13.4	4.6	4.6	17.2	52.3	1350.1
Santa Rosa de Copan	156.5	306.7	211.6	217.7	301.6	164.9	79.6	60.8	40.0	26.4	22.7	45.2	1633.7

*Fuente: Servicio Meteorológico Nacional

Tabla 4 Registros de temperatura medios mensuales de las estaciones La esperanza y Sanata Rosa

Registros Medios Mensuales de Temperatura [°C] en las ciudades de Santa Rosa de Copán y La Esperanza													
Estación	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	Anual
La Esperanza	18.9	18.9	18.5	18.8	18.8	18.1	16.4	15.7	15.6	16.4	17.5	18.8	17.7
Santa Rosa de Copan	22.4	21.9	21.3	21.6	21.4	20.3	19.0	18.0	17.9	18.9	20.8	22.2	20.5

*Fuente: Servicio Meteorológico Nacional

Tabla 5 Registros de Humedad Relativa medios mensuales de las estaciones La esperanza y Sanata Rosa

Registros Medios de la Humedad Relativa [%] en las ciudades de Santa Rosa de Copán y La Esperanza													
Estación	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	Promedio
La Esperanza	60.6	77.4	74.6	76.2	80.2	79.8	78.4	76.1	73.3	65.7	61.1	62.1	72.1
Santa Rosa de Copan	76.3	81.3	82.5	82.6	83.7	85.5	86.7	86.8	84.2	80.2	74.8	72.9	81.5

*Fuente: Servicio Meteorológico Nacional

4.5.1. El Régimen Pluvial en la Región

No obstante, lo estrecho y pequeño del territorio hondureño, su posición rodeada por ambos océanos y su carácter *tropical*, el régimen de las lluvias observa amplias variaciones. El gráfico No.4., establece una comparación entre el régimen pluvial de la Región de interés, en el núcleo montañoso del occidente hondureño, representado en este proceso por las Estaciones climatológicas de La Esperanza y Santa Rosa de Copán, y los regímenes pluviales característicos de las regiones litorales del norte y sur del país, representados por las estaciones pluviométricas de La Ceiba y Choluteca respectivamente. Observando una mayor similitud con el régimen del sur del país. De igual forma, se observa que los índices pluviales de Angot (de Fina & Ravello, 1993) de febrero y marzo son los más secos.

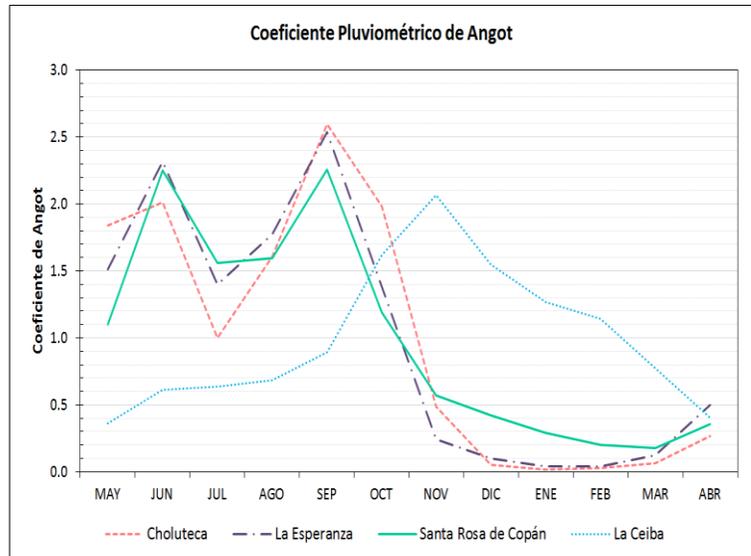


Gráfico 4 Coeficiente Pluviométrico de Angot.

Fuente: elaboración propia a partir de los registros de las estaciones mencionadas.

La Región Sur (representada en gráfico por la estación de Choluteca) está condicionada por el avance de la ITCZ (Zona intertropical de convergencia), según los índices de los registros, inicia sus aportes pluviales, en términos promedio, en el mes de mayo, con un máximo en el mes de junio, para luego, mermar sus índices entre los meses de julio y agosto con la parcial retirada del fenómeno citado. Luego toma lugar un nuevo avance estacional en la segunda quincena del mes de agosto, siempre en términos promedio para, posteriormente, dar paso a una temporada considerablemente seca, con mayor énfasis en los meses de diciembre enero y febrero. La Región Norte por su parte (representada en gráfico por la estación de La Ceiba), según los registros pluviales, presenta una distribución pluvial diferente, con aportes máximos entre noviembre y enero con el arribo de los frentes fríos y las masas de aire frío de origen polar.

En la ciudad de La Esperanza, por su parte, separada de la vertiente atlántica por el parteaguas continental, se observan características semejantes a las del Litoral Sur con coeficientes igualmente reducidos a partir de mediados del mes de noviembre. En Santa Rosa de Copán, al interior de la subcuenca de Río Jicatuyo, el gráfico anterior muestra una representación similar a la Región Sur con excepción del período seco cuyos índices son más altos por las aportaciones que recibe la región con ocasión de las Ondas del Este que arriban procedentes del Cabo de Gracias a Dios, en donde penetran al territorio hondureño.

4.5.2. Distribución espacial de la Lluvia Media Mensual. Mapas de Isoyetas

Son varias las instituciones estatales que poseen Estaciones de registro pluvial en la Región Occidental de Honduras y cada una conserva discretamente su banco de datos. Contabilizando 21 estaciones pertenecientes a ENEE, DGRH, SMN/CENAOS. Un resumen mensual de los registros diarios permitió resumir la serie mensual de la lluvia en 21 Estaciones pluviométricas dentro de la subcuenca de Río Jicatuyo y próximas a la misma con cuyos valores se construyeron los patrones espaciales para cada mes del año hidrológico (i.e. Período de doce meses durante el cual ocurre un ciclo anual climático completo) que corresponde desde el inicio de las lluvias en el mes de mayo hasta el mes de abril, mediante el trazo de *Isoyetas*. La ilustración No.25., muestra el patrón de distribución que corresponde al promedio anual de la cuenca.

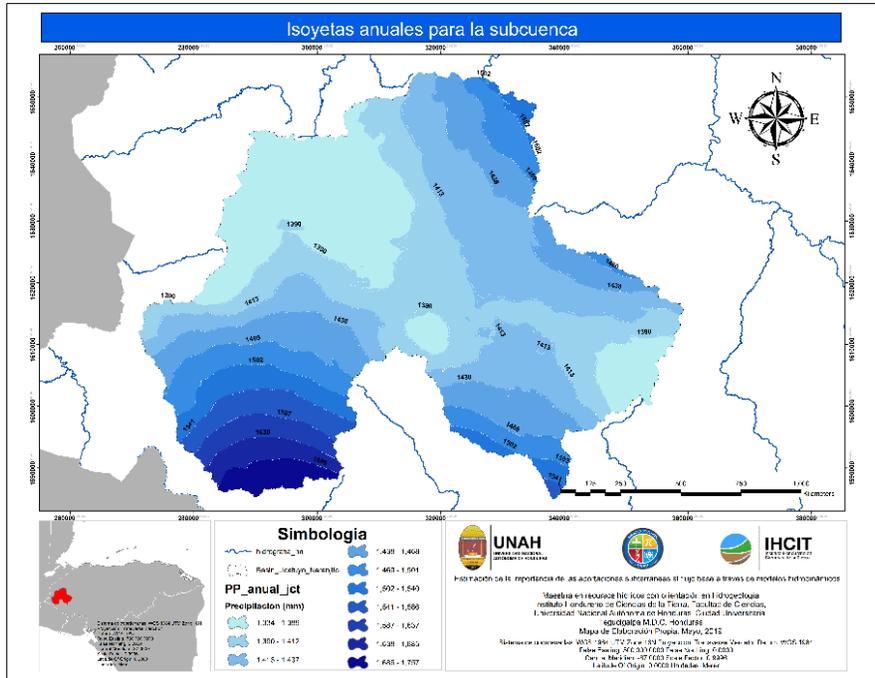


Ilustración 25 Mapa de distribución espacial de la lluvia media anual para el periodo 1970-2006
Fuente: Elaboración propia mediante proceso de interpolación Co-Kriging

En la proyección puede apreciarse que, como consecuencia de la orografía predominante en la región, las estribaciones montañosas de cabecera de la subcuenca reciben los mayores aportes de pluviosidad, luego estas cantidades se reducen en los valles intramontanos y en aquellas laderas opuestas al flujo de humedad que aportan los vientos Alisios, hasta en un 40 por ciento aproximadamente.

4.5.3. Volúmenes captados por la superficie de la Cuenca

La tabla No.6., resume una estimación de los valores mensuales promedio del año hidrológico, captados por la superficie de la cuenca del Río Jicatuyo con el apoyo de los mapas mensuales antes citados:

Tabla 6 Volúmenes medios mensuales precipitados dentro de la subcuenca

Volúmenes de Lluvia captados por la Cuenca de Contribución del Río Jicatuyo													
Aguas arriba del Sitio de Potencial Derivación [MMC]													
Mes	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	Anual
Volumen Precipitado	504.3	945.1	688.6	792.7	980.6	531.3	220.5	160.9	110.3	91.5	82.6	191.2	5299.6

*MMC – millones de metros cúbicos.
Fuente: Elaboración Propia.

De los valores anteriores se estima que, durante la temporada seca, Nov-Abr, la cuenca escasamente capta un 16.2 % de las aportaciones pluviales anuales.

4.6.Hidrometría

El Río Jicatuyo fue identificado como Proyecto en los estudios de evaluación del potencial hidroeléctrico de la Región Nor-Occidental de Honduras desde hace más de 40 años (Harza–Cinsa 1979, C. T. Main, ENEE 1984). Como consecuencia de tal evaluación, la Empresa Nacional de Energía Eléctrica (ENEE) con apoyo del Proyecto Hidrometeorológico Centro Americano (PHCA) de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) trabajaron en establecer una red de monitorio dentro de la subcuenca. Con tal fin se ubicó en las cercanías del antiguo poblado de Santiago de Posta la estación de aforo Ulapa (UTM 327992m E, 1656345m N) en la cota 320 msnm. Propiedad de la ENEE. En este sitio se realizan mediciones de nivel del río por parte de la DGRH de manera continua y aforos de la corriente de forma intermitente. La ilustración No.26., indica la ubicación del sitio de aforo, así mismo, la tabla No7., presenta los aforos de la corriente en el sitio mencionado.

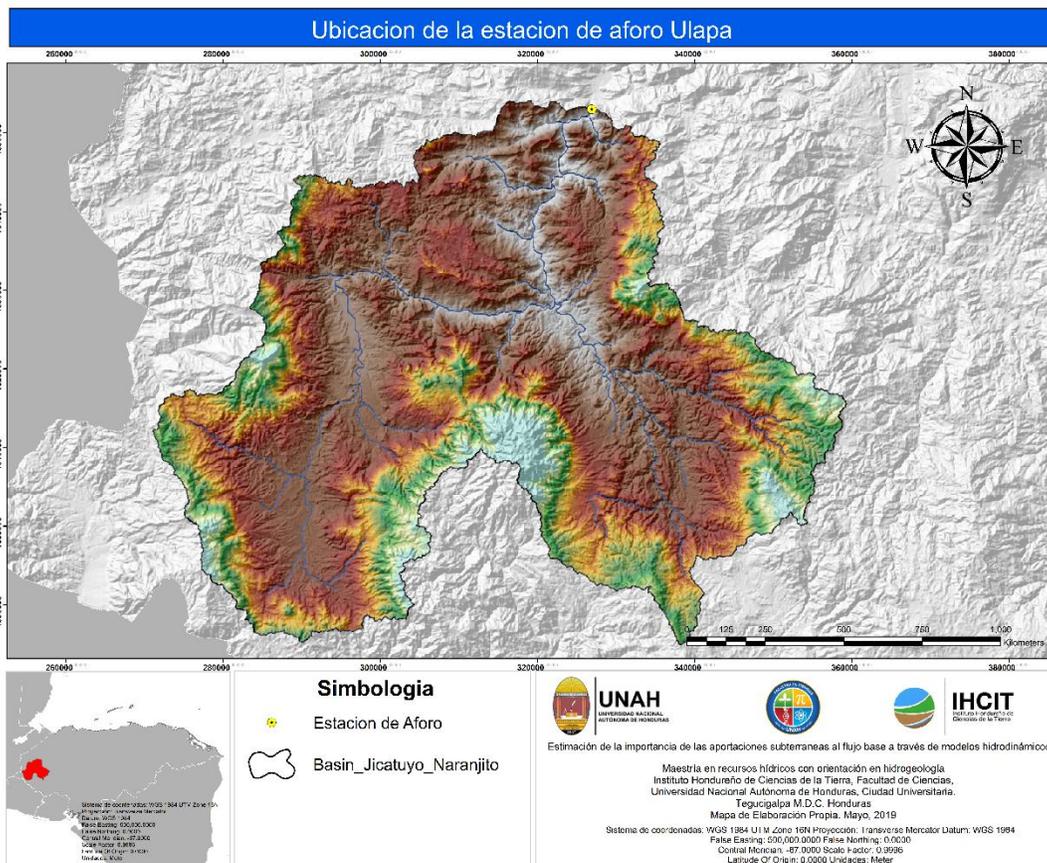


Ilustración 26 Mapa de Ubicación de la estación hidrométrica Ulapa
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 7 Resumen de aforos realizados en la estación hidrométrica Ulapa, por parte de la DGRH.

Resumen de Aforos practicados en la Estación Hidrométrica Ulapa									
Aforo No.	Fecha	Lectura de Escala H [m]	Ancho de Sección B [m]	Área Hidráulica A _H [m ²]	Velocidad Media V _m [m/s]	Caudal Q [m ³ /s]	Perímetro Mojado P _M [m]	Radio Hidráulico R _H [m]	Profundidad Hidráulica D [m]
1	31.10.00	0.910	44.30	43.75	0.96	42.17	44.514	0.983	0.988
2	03.11.00	0.810	45.00	39.88	0.95	37.78	45.223	0.882	0.886
3	27.07.01	1.165	50.00	58.78	1.01	74.72	50.425	1.166	1.176
4	14.11.01	0.940	47.01	47.40	1.03	48.94	47.32	1.002	1.008
7	13.09.02	1.305	50.00	66.12	1.12	83.23	50.48	1.310	1.322
8	02.10.02	1.580	51.82	79.91	1.58	134.49	49.62	1.610	1.542
9	21.11.02	0.760	43.60	39.89	0.78	30.93	43.86	0.910	0.915
10	24.09.03	1.795	52.01	90.58	1.71	155.25	52.86	1.714	1.742
22	14.10.09	0.850	44.50	41.14	0.86	35.72	-	-	0.924
11	25.11.03	0.810	42.01	41.81	0.75	31.53	42.22	0.990	0.995
12	04.02.04	0.490	39.02	26.93	0.49	13.31	39.18	0.687	0.690
13	16.03.04	0.390	35.06	22.51	0.39	8.84	35.24	0.639	0.642
14	27.04.04	0.360	32.01	20.21	0.38	7.65	32.16	0.628	0.631
15	17.08.04	0.900	45.00	47.47	0.81	38.36	45.24	1.049	1.055
16	19.10.04	1.920	50.00	97.21	1.84	178.67	-	-	1.944
17	13.04.05	0.300	31.10	19.31	0.29	5.62	31.22	0.619	0.621

Fuente: Dirección general de Recursos hídricos, MiAmbiente.

Seguidamente la gráfica No.5., muestra las lecturas de nivel a escala diaria en la estación.

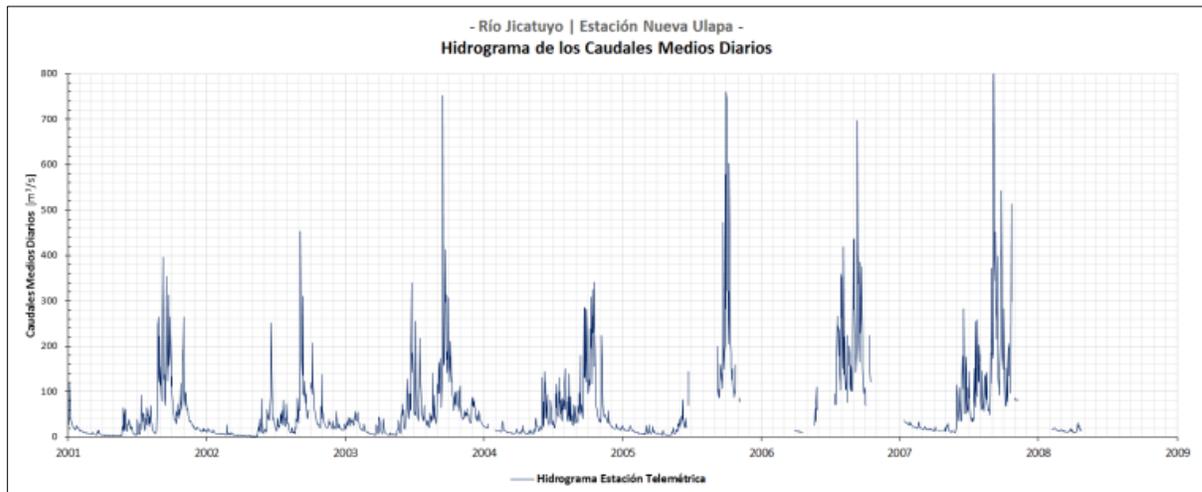


Gráfico 5 Hidrograma de caudales medios diarios para el periodo 2001-2008

Fuente: Elaboración propia a partir de los registros realizados por la DGRH

5. CAPITULO IV: METODOLOGÍA

En este capítulo se define el enfoque, alcance y diseño de la investigación. La metodología que se emplea presenta rigor científico, en ella se utilizan métodos y técnicas de forma sistematizada para alcanzar los objetivos planteados.

5.1. Tipo de investigación

En cuanto al enfoque y metodología de la investigación, esta es de carácter mixto con enfoque dominante cuantitativo, dado que se recolectan datos para su posterior análisis que se caracterizan por ser datos cuantitativos principalmente y en menor realizar un análisis cualitativo.

Se recolectó principalmente mediciones de las variables hidrometeorológicas que se orienten la obtención de subprocesos que es la aportación del acuífero al caudal del río, conviene subrayar que las variables de estudio no estarán sujetas a manipulación por parte de los investigadores.

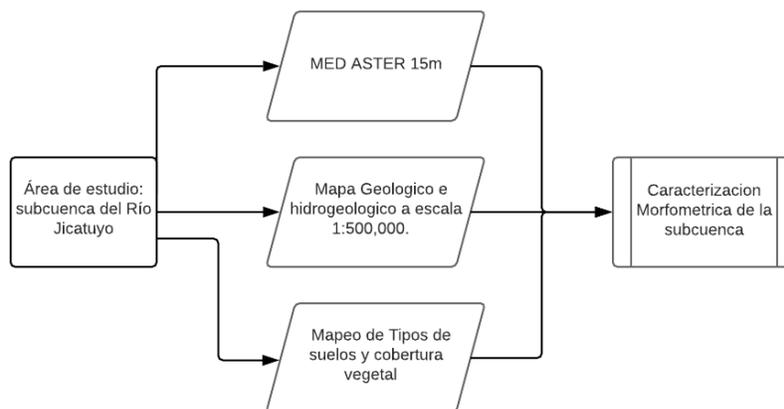
5.2. Diseño de la investigación

Con el diseño de la investigación se pretende dar respuestas a las preguntas planteadas, definiendo la forma de recolección de datos. Concretamente, La investigación se incrusta en el campo no experimental transversal, es decir no hay manipulación de las variables y la utilizar un método mixto, se complementa la información cualitativa y cuantitativa para obtener una visión más amplia de los resultados.

5.3. Proceso metodológico

a. Recolección de la información existente

Esto se basó en la búsqueda de información pertinente al área de estudio, el primer insumo fue un modelo de elevación digitada ASTER de acceso gratuito y que cuenta con una resolución de 30 metros. Posteriormente se localizó otra información existente como es: Mapas geológicos nacionales, hidrogeológicos con una escala de 1:500,000 SINIT (1991), mapa de ubicación de estaciones hidrometeorológicas elaborado por MiAmbiente (2014). Se cuenta además con información recopilada de elaboración para el sitio de mapa de tipo suelos predominantes en la subcuenca, así como cobertura vegetal presente. La ilustración No.27., presenta el flujo de trabajo en este apartado.



*Ilustración 27 Proceso metodológico para la recolección de datos espaciales.
Fuente Elaboración propia.*

se identificaron las series de suelos, mediante la comparación de los perfiles de suelos descritos, con los perfiles de las series contenidas en el informe elaborado para el gobierno de Honduras por la FAO C.S Simmons (1969), principalmente en lo concerniente a profundidad, color, textura, pendiente y tipo de material parental. Además, se corrigieron sus límites, haciendo uso de imágenes de satélite (Google Earth.) y empleando también mapas de otros estudios de la misma zona como ser el Manual de referencias hidrológicas del FHIS (2002) y Evaluación de Impacto Ambiental de las Centrales Hidroeléctricas Los Llanitos y Jicatuyo - Línea de Base en Época de Verano. ESA Consultores (2012).

b. Recolección y análisis de las variables hidrometeorológicas.

La información partió de un inventario de estaciones climatológicas presentes en la subcuenca pertenecientes a diferentes instituciones públicas del país entre ella la ENEE, MiAmbiente y el SMN o actualmente CENAOS, una vez localizadas se generó con el uso de herramientas de información geográfica un mapa de la distribución espacial de las estaciones próximas a la subcuenca, así mismo, se recolecto la información disponible y siguiendo las recomendaciones de la OMM (2012) se realizó el tratamiento estadístico verificando la continuidad y calidad de las series de datos(i.e. Consistencia, homogeneidad con el fin de obtener las diferentes variables necesarias para la estimación de la precipitación media en la cuenca aplicando para ello interpolaciones de los datos de precipitación aplicando en este caso el método de interpolación de Kriging y su variante Co-Kriging.

Kriging es un procedimiento de interpolación espacial de estado avanzado, que genera una superficie aproximada a partir de un conjunto disperso de puntos con valores a interpolar a su vez involucra un análisis interactivo del comportamiento espacial del fenómeno en análisis, a fin de generar la distribución en el espacio de la variable interpolada.

A la par, se recolecto la información hidrométrica del Río Jicatuyo que permita la calibración de un modelo hidrológico, en este punto se logró acceso a la información generada por MiAmbiente, donde la DGRH con el apoyo de USGS y posteriormente el

PMDN en 2001 instalaron un dispositivo telemétrico que registraba niveles de río y realizaron múltiples aforos en el sitio. Lo que permitió elaborar una curva de gasto.

La curva de gasto se obtiene determinando la ecuación de descarga o gasto (gráfica No.6), Por lo general, el valor de h_0 no se conoce y las observaciones realizadas son valores de Q correspondientes para lecturas h . Entonces, h_0 se determina asumiendo valores de prueba y error, para facilitar la lectura directa de la descarga de corriente de cualquier lectura de nivel observado h . Se acostumbra a trazar la curva de gastos con Q como abscisa y ordenada como h . Como, el argumento de Q vs. $(h - h_0)$ en un papel log-log da una línea recta cuya pendiente es n . de esta manera se estiman caudales a partir de niveles de río.

$$\underbrace{\log Q}_y = \underbrace{\log K}_c + \underbrace{n}_m \underbrace{\log (h - h_0)}_x$$

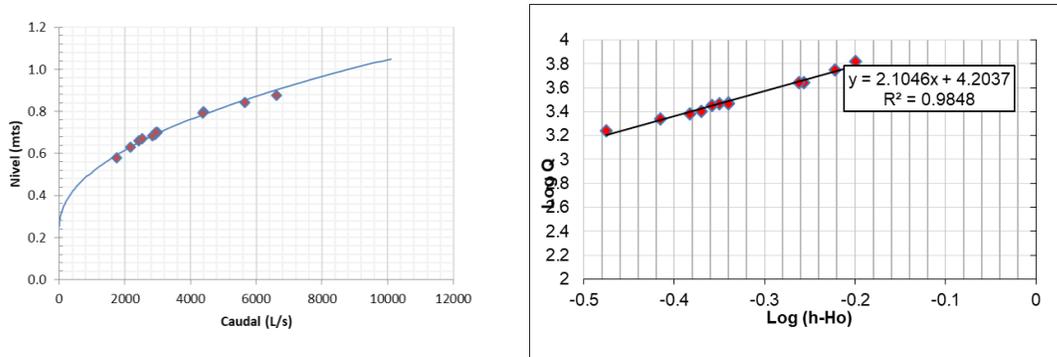


Gráfico 6 Curva de Descarga (izquierda), Relación nivel de río - caudal (derecha).
Fuente: Elaboración propia.

La ilustración No.28 muestra el proceso a seguir.

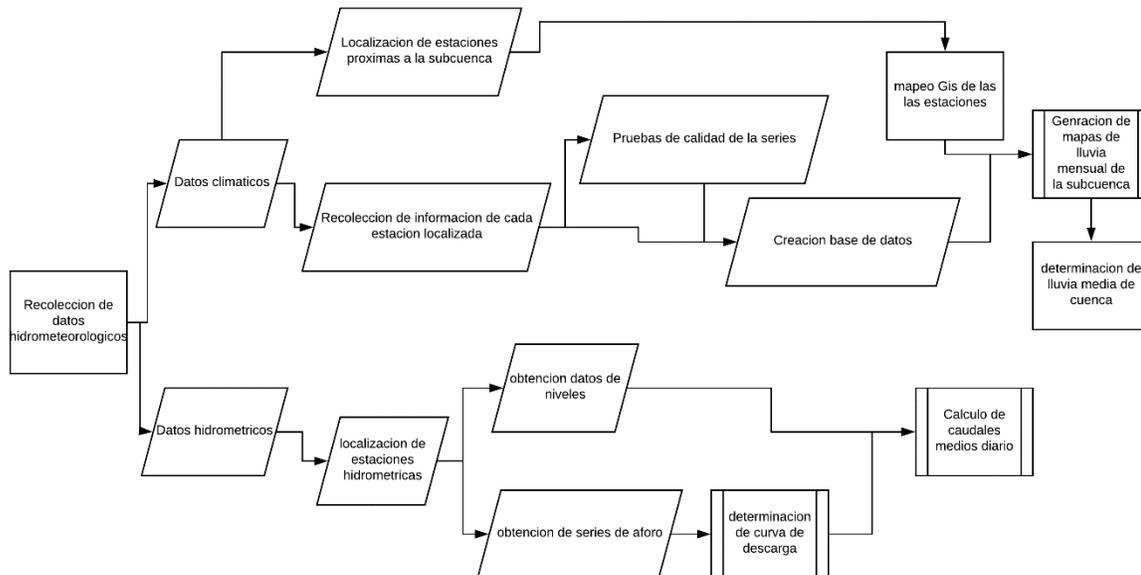


Ilustración 28 Proceso metodológico para la estimación de los parámetros hidrometeorológicos.
Fuente: Elaboración propia

Con lo anterior se puede obtener:

- Ubicación de las estaciones existentes tanto hidrométricas y climatológicas en la subcuenca.
- Volumen de lluvia precipitado sobre la subcuenca
- Temperaturas medias diarias.
- Caudales medios diarios del río.

Valores que sirven de insumo al modelo hidrológico a utilizar.

c. Modelo hidrológico

Un modelo hidrológico integra los distintos procesos del ciclo hidrológico para generar variables útiles para el análisis de los recursos hídricos como la evaporación, infiltración, caudales superficiales y subterráneos, entre otros.

los datos fundamentales necesarios en la modelación hidrológica incluyen series de datos meteorológicos, datos de suelo y cobertura de suelo e información sobre la hidrografía de la cuenca, esto permite realizar un balance hídrico que resulta en la respuesta del río a los diferentes parámetros hidrológico.

En la búsqueda de las variables para la modelación se partió de la base de datos generada con anterioridad en este caso datos de precipitación, temperatura y caudal. En el caso de la precipitación esta debe ser representativa de la subcuenca y a una escala temporal diaria, para lo cual fue necesario la utilización del método de Thiessen (H. Thiessen, 1911). Lo que permite asignar un peso, es decir un grado de influencia para cada estación utilizada para generar la serie de lluvia media diaria dentro de la subcuenca.

En el caso de la temperatura este es un insumo para la estimación de la evapotranspiración potencial, la cual es la que se utiliza en la modelación hidrológica ya sea a escala diaria o mensual, según el modelo aplicado, en Honduras el número de Estaciones que miden los parámetros necesarios para una mejor estimación de evapotranspiración es reducido (aproximadamente 14 estaciones a nivel nacional).

Teniendo así que, para la cuenca de Río Jicatuyo, de las 13 estaciones de lluvia, únicamente Ulapa y Santa Rosa de Copán (pertenecientes a la ENEE y CENAOS respectivamente) cuentan con algunas variables que influyen en el proceso de la evaporación. Así, para la estimación de las pérdidas por evapotranspiración se utilizó la ecuación Hargreaves (G. Hargreaves y Samani, 1983) en la cual los parámetros necesarios se indican a continuación:

- **Radiación Solar Extraterrestre:** del cual se utilizó la tabla presentada en el documento de FAO 56 (Allen et al. 1998) en función de la latitud y el mes.
- **Temperatura Media Mensual:** se calculó como el promedio entre la Temperatura Máxima Promedio Mensual y la Temperatura Mínima Promedio Mensual.
- **Rango de Temperatura:** se ha estimado como la diferencia entre la Temperatura Máxima Promedio Mensual y la Temperatura Mínima Promedio Mensual.

Obtenidos las variables de entrada para los modelos el siguiente paso es la determinación de que modelo o clase de modelo utilizar. Todo intento utilizar modelos determinísticos como hidrodinámicos, conceptuales o de caja negra obliga a tomar una decisión acerca del grado de empirismo que está dispuesto a aceptar, sin embargo, esto es, en cierta medida, arbitraria, en el sentido de que el empirismo de una persona puede ser la teoría de otra (Singh, 1988).

Para el desarrollo del trabajo de investigación la selección del modelo es crucial debido a que se intenta simular condiciones físicas del medio. Por tal motivo se empleó el modelo conceptual hidrológico HBV/IHMS (Bergstrom 1992, 1995). La modelización de la humedad del suelo en el modelo HBV está basada en una modificación del método tanque (Sugawara y otros, 1974), consistente en presuponer una distribución estadística de las capacidades de almacenamiento en la cuenca. Este es el control principal de la formación de escorrentía. La evapotranspiración potencial es reducida a sus valores reales, conjuntamente con el déficit creciente de humedad del suelo en el modelo.

Seleccionado el modelo y la obtenidas las variables de entrada el siguiente paso es la poner en formato necesario la información de entrada para que pueda ser leído por este. La ilustración No.29., muestra la estructura que requiere el modelo.

'p'					ID,NAME,LAT, LONG	
16					1,Belen_Gualcho,14.478,-88.7897	
UlapaP"					2,Belen_Lempira,14.506,-88.49	
1					3,Cololaca,14.305,-88.8819	
1971	1	1	24	-9999	4,D_N_Copan,14.847,-88.831	
1971	1	2	24	-9999	5,El_Tablón,14.731,-88.4516	
1971	1	3	24	-9999	6,Erandique,14.232,-88.467	
1971	1	4	24	-9999	7,Gualtaya,14.678,-88.8219	
1971	1	5	24	-9999	8,La_Campa,14.053,-87.3913	
1971	1	6	24	-9999	9,Lepaera,14.78,-88.59	
1971	1	7	24	-9999	10,M_S_Andres,14.7627,-88.841	
1971	1	8	24	-9999	11,S_J_Montana,14.692,-88.356	
1971	1	9	24	-9999	12,S_R_Copan,14.5833,-88.5833	

Ilustración 29 Formato requerido para el modelo HBV.
Fuente: Elaboración propia siguiendo los requerimientos de modelo HBV

El siguiente paso es la parametrización del modelo el cual es uno de los aspectos más difíciles a la hora de aplicar modelos conceptuales para una subcuenca específica. La mayoría de los parámetros fueron determinados mediante procesos iterativos manuales, basados en datos históricos de entrada-salida. A causa de las limitaciones de los datos, de las imperfecciones de los modelos y de las interrelaciones entre los parámetros de los modelos, la incorporación de un gran número de parámetros adicionales dificultará considerablemente la calibración. Por consiguiente, fue necesario que el número de parámetros sea compatible con la fiabilidad de los datos entrantes y con el grado de exactitud requerido, por tal motivo de las 57 variables con que cuenta el modelo se simplificaron procesos llegando a utilizar únicamente 20 variables.

La calibración del modelo se realizó principalmente de forma visual, buscando una concordancia entre los valores de caudal registros y los de la simulación y que a su vez permita obtener coeficientes de eficiencia lo más próximo a la unidad, para ello el modelo

cuenta con un interfaz que facilita dicho trabajo. La ilustración No.30., presenta un ejemplo de la interfaz de modelo para calibración.

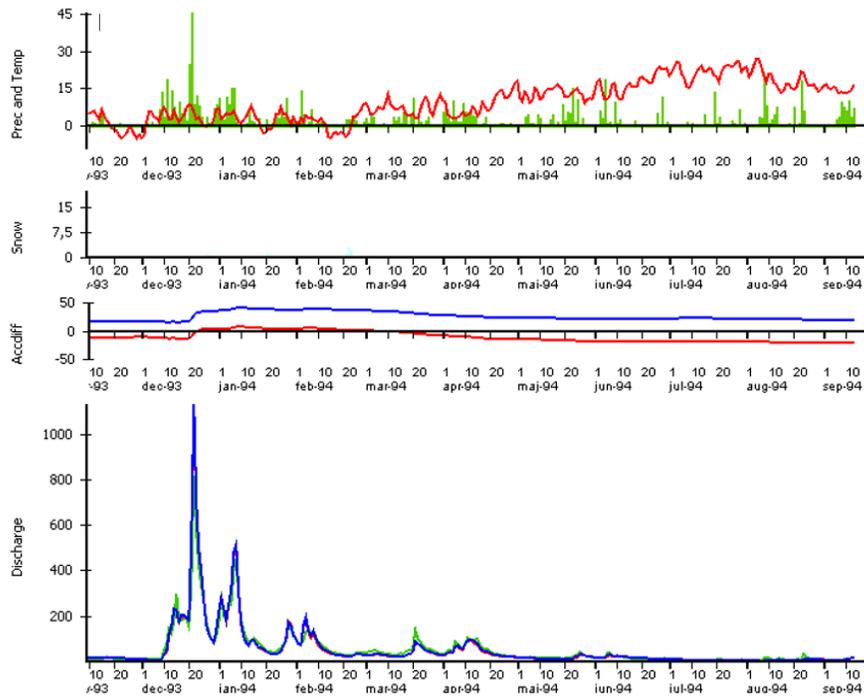


Ilustración 30 Interfaz del modelo HBV para calibración.

Fuente: Modelo IHMS/HBV.

La ilustración No.31., muestra el proceso llevado a cabo para obtener una serie de caudales simulados continua que sea de aplicabilidad para los fines de esta investigación.

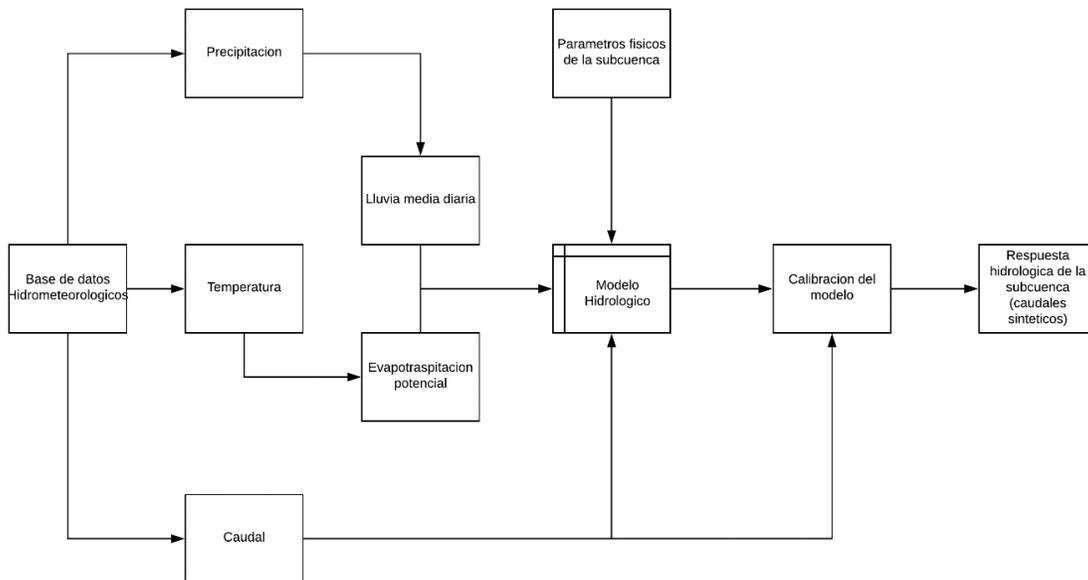


Ilustración 31 Proceso metodología para la modelación hidrodinámica de una cuenca.

Fuente: Elaboración propia

5.4. Separación de caudal base y valoración del recurso.

La consideración de estas aportaciones subterráneas tiene una gran importancia en la valoración completa de los recursos hídricos disponibles a lo largo del año, pues constituyen, con frecuencia, la única contribución que se mantiene durante periodos largos ausentes de precipitación, especialmente en la época de estiaje.

5.4.1. Curva de duración de frecuencia

Esta es una curva que indica el porcentaje del tiempo durante el cual los caudales han sido igualados o excedidos. Su construcción es simple, se parte de ordenar los caudales medios con los que se esté trabajando y se ordenan de manera descendiente y se les asigna un número de orden, para luego asignarle una probabilidad empírica y finalmente graficar caudales en las ordenados y frecuencia o probabilidad en las abscisas.

5.4.2. Curva de recesión

Esta curva se obtiene de manera analítica generando una función de caudales de salida con respecto al tiempo, lo que normalmente se encuentran en días. Dicha función se puede linealizar aplicando logaritmo natural

$$\ln Q_t = \ln Q_0 - (t - t_0)k$$

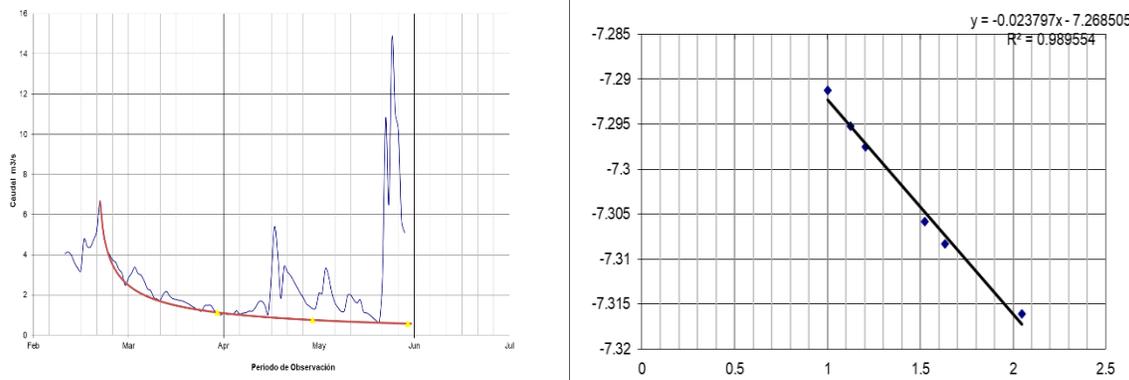


Gráfico 7 Curva de recesión de un río (izquierda), Relación linealizada caudal, tiempo. (derecha).

Fuente: Elaboración Propia.

La Línea roja indica en un caso hipotético de ausencia de lluvia el decaimiento del caudal del río en el tiempo.

5.4.3. Método filtrado recursivo

El método recursivo, ya sea el de un filtro Lyne y Hollick (1979), o el doble filtro Eckhardt (2005). Son susceptibles a la discontinuidad de los datos de caudal, se utilizaron los datos modelados para el periodo 1971 – 2006 utilizando en hoja de cálculo los algoritmos planteados para cada uno de ellos, en el caso ambos casos se utilizó un valor de α igual a 0.925 y dado las características del río bajo análisis es utilizó un valor de 0.80 como segundo filtro. Una vez que los caudales fueron separados en flujo base y superficial se procedió al cálculo del índice ICB.

5.4.4. Separación del caudal base mediante modelado hidrológico

El HBV ofrece multitud de variables de salida empleándose en este estudio “scout”, que es el caudal estimado, y “outlz” definido como “salida de flujo desde el reservorio de respuesta inferior” que podemos considerarlo como el aporte del flujo basal o aporte desde el acuífero al caudal del río.

La ilustración No.32., muestra el proceso lleva a cabo para separar los caudales en sus componentes principales.

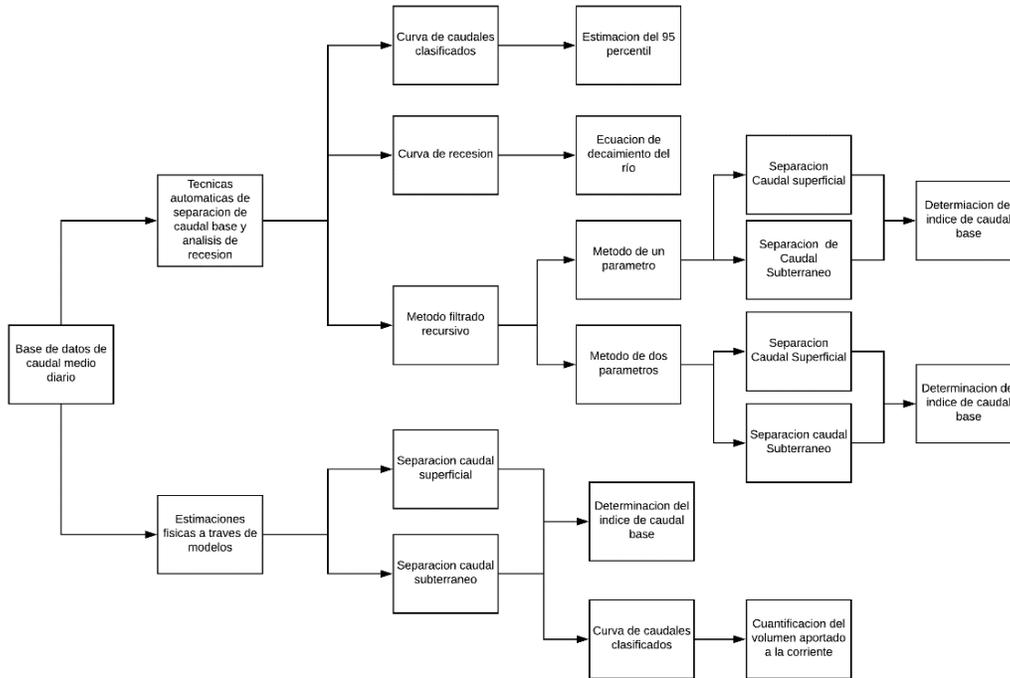


Ilustración 32 Proceso metodológico para la determinación del caudal base (aporte del acuífero al caudal del río).
Fuente: Elaboración Propia.

5.5. Operacionalización de las variables

En todo proceso de investigación existen dos grandes grupos de variables. Las denominadas variables independientes (X) y las variables dependientes (Y). Las variables independientes, son llamadas también causales o experimentales y son aquellas que producen la variación o modificación de las variables dependientes, y son las que manipula el investigador, la operacionalización de estas tiene el fin de convertir un concepto abstracto en uno empírico, susceptible de ser medido a través de la aplicación de un instrumento.

Dicho proceso tiene su importancia en la posibilidad que el investigador tenga la seguridad de no cometer errores en el proceso investigativo, ya que cuando no existe relación entre la variable y la forma en que se decidió medirla, pierde su validez.

Tabla 8 Matriz de operacionalización de las variables del estudio.

variable	definición	método de obtención	unidades
Variables independientes			
Precipitación	1) Elementos líquidos o sólidos procedentes de la condensación o sublimación del vapor de agua que caen de las nubes o son depositados desde el aire en el suelo. 2) Cantidad de precipitación caída sobre una unidad de superficie horizontal por unidad de tiempo.	Instrumento para medir la altura de agua de precipitación en un punto. Conocido como pluviómetro	mm/día
temperatura	es una magnitud física que indica la intensidad de calor o frío de un cuerpo, de un objeto o del medio ambiente,	Termómetro ambiente	°C
Humedad relativa	Relación porcentual a una presión y temperaturas dadas entre el peso molecular en gramos del vapor de agua y el peso molecular en gramos que el aire tendría si estuviese saturado de agua a la misma presión y temperatura.	higrómetro Instrumento para medir la humedad relativa de la atmósfera y determinar el punto de rocío.	%
Radiación solar extraterrestre	es la radiación solar diaria que se recibe sobre una superficie horizontal situada en el límite superior de la atmósfera.	Piranómetro es un instrumento para medir la radiación solar a una superficie plana	Mj/día
Caudal	Volumen de agua que fluye a través de una sección transversal de un río o canal en una unidad de tiempo	aforo por vadeo que consiste en atravesar el lecho del río y medir las alturas y velocidades.	m ³ s ⁻¹
Variables dependientes			
evapotranspiración potencial	Cantidad máxima de agua que puede evaporarse en un clima dado por una cubierta vegetal continua y bien alimentada de agua; por lo tanto, incluye la evaporación del suelo y la transpiración vegetal en una región determinada y en un intervalo de tiempo dado	Estimado mediante aproximaciones numéricas	mm/día
evapotranspiración real	Cantidad de agua evaporada y transpirada desde el suelo y la cubierta vegetal.	Estimado mediante aproximaciones numéricas	mm/día
caudal	Caudal que se incorpora a una corriente de agua, procedente principalmente de aguas subterráneas, aunque también de lagos, durante períodos largos en los que no se produce ni precipitación.	Estimado mediante aproximaciones numéricas	m ³ /día

Fuente: Elaboración propia.

6. CAPITULO V: RESULTADOS.

Análisis de frecuencia de los aportes de Lluvia Anual. Clasificación de los años hidrológicos según sus aportes pluviales

Los registros de precipitación de las estaciones circundantes a la subcuenca fueron analizados estadísticamente en el estudio Actualización del Balance Hídrico Nacional (2012), desarrollado por la Secretaría de Recursos Naturales, Ambiente y Minas, MiAmbiente, en el cual se realizaron todas las pruebas de aleatoriedad y homogeneidad de todas las estaciones en el territorio nacional. Lo que proporciona validez estadística a los datos de precipitación registrados lo que posteriormente permite a través de la metodología de Thiessen (Alfred H. Thiessen, 1911) estimar Los aportes de lluvia anuales de las estaciones con registros más amplios fueron normalizadas para poder estimar el índice de clasificación climática (McKee, Doesken y Kleist, 1993), los cuales fueron comparados con la condición ENOS predominante (Tabla No.9., gráfica No.8.).

Tabla 9 Clasificación relativa de la lluvia en la subcuenca

Clasificación de los Aportes Anuales de la Lluvia de Cuenca					
Año Hidrológico	Precipitación Media de Cuenca [mm]	Z	Clasificación	Condición Climática*	
1972-73	1148.5	-1.86	Muy Seco	Niño Fuerte	
1973-74	1554.9	-0.22	Promedio Seco	Niña Fuerte	
1974-75	1665.6	0.22	Promedio Lluvioso	Neutro	
1975-76	1595.9	-0.06	Promedio Seco	Niña Fuerte	
1976-77	1444.1	-0.67	Seco	Neutro	
1977-78	1491.1	-0.48	Promedio Seco	Niño	
1978-79	1534.5	-0.31	Promedio Seco	Neutro	
1979-80	1925.7	1.27	Lluvioso	Neutro	
1980-81	1718.2	0.44	Promedio Lluvioso	Neutro	
1981-82	1993.0	1.55	Muy Lluvioso	Neutro	
1982-83	1444.5	-0.67	Seco	Niño Fuerte	
1983-84	1809.9	0.81	Lluvioso	Neutro	
1984-85	1880.8	1.09	Lluvioso	Neutro	
1985-86	1561.7	-0.20	Promedio Seco	Neutro	
1986-87	1084.1	-2.12	Muy Seco	Niño Débil	
1987-88	1322.8	-1.16	Seco	Niño	
1988-89	1872.0	1.06	Lluvioso	Niña Fuerte	
1989-90	1886.3	1.11	Lluvioso	Neutro	
1990-91	1457.4	-0.62	Seco	Neutro	
1991-92	1634.2	0.10	Promedio Lluvioso	Niño Fuerte	
1992-93	1812.4	0.82	Lluvioso	Niño	
1993-94	1502.5	-0.44	Promedio Seco	Neutro	
1994-95	1228.0	-1.54	Muy Seco	Niño	

1995-96	1875.0	1.07	Lluvioso	Neutro
1996-97	2031.7	1.70	Muy Lluvioso	Neutro
1997-98	1587.8	-0.09	Promedio Seco	Niño Fuerte
1998-99	1699.5	0.36	Promedio Lluvioso	Niña
1999-00	1755.8	0.59	Lluvioso	Neutro
2000-01	1763.4	0.62	Lluvioso	Niña
2001-02	1539.0	-0.29	Promedio Seco	Neutro
2002-03	1373.7	-0.96	Seco	Niño
2003-04	1511.8	-0.40	Promedio Seco	Neutro
2004-05	1174.0	-1.76	Muy Seco	Neutro
2005-06	1870.1	1.05	Lluvioso	Neutro
2006-07	1909.5	1.21	Lluvioso	Neutro
2007-08	1710.3	0.41	Promedio Lluvioso	Niña Débil
2008-09	2059.4	1.82	Muy Lluvioso	Niña
2009-10	1508.4	-0.41	Promedio Seco	Niño
2010-11	1697.2	0.35	Promedio Lluvioso	Niña
2011-12	2028.2	1.69	Muy Lluvioso	Niña
2012-13	1400.6	-0.84	Seco	Neutro
2013-14	1369.8	-0.97	Seco	Neutro

**descripción obtenida del centro de predicciones climáticas (CPC)*

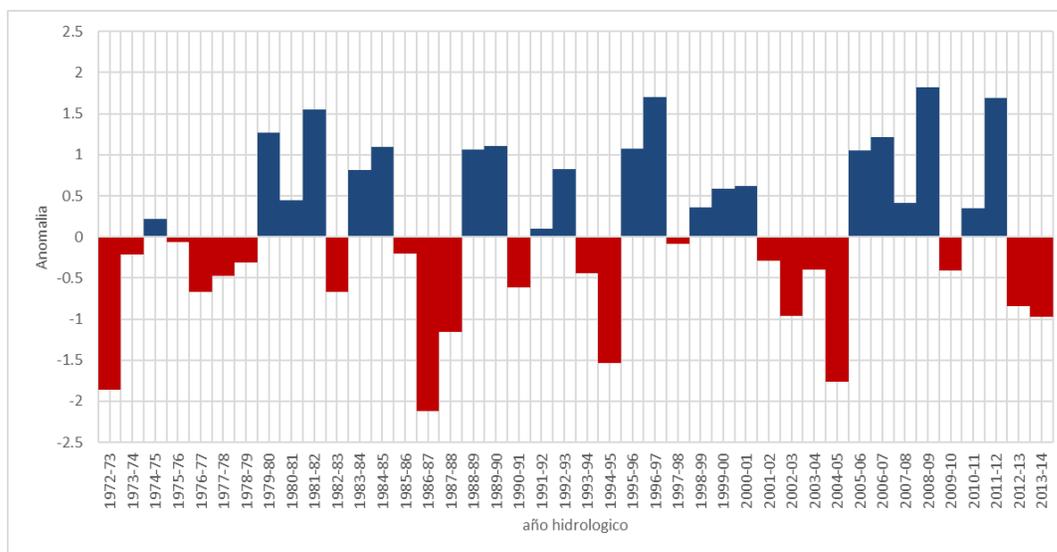


Gráfico 8 Variación de la anomalía en la precipitación para el periodo 1972-2014.

Fuente: Elaboración propia

A partir de los resultados en la Tabla No.9., se observa que no existe una relación entre la clasificación anual y la condición ENOS, es decir, no todos los años con merma en la precipitación responden a un evento ENOS. De igual forma, durante el periodo analizado, se observa un ciclo de disminuciones de la precipitación con frecuencia entre 2 a 4 años y una duración que varía entre 2 a 3 años con un máximo de 4.

6.1. Recopilación de la lluvia diaria en las diversas Estaciones. Precipitación media de la cuenca

Como requisito para el modelaje hidrológico, que busque relacionar los componentes y procesos que intervienen en la descarga de agua al río, es necesario información pluviométrica de pasos de tiempo de un día. En este sentido son varias las estaciones pluviométricas ubicadas dentro y próximas a la cuenca que cuentan con información diaria de precipitación; sin embargo, algunas han sido canceladas y otras, mal operadas. Los sitios que se consideraron, en primera instancia, para estimar los aportes de la lluvia, fueron los trece que se indican en la tabla No.10., y la ilustración No.33.

Tabla 10 estaciones pluviométricas seleccionadas para la modelación hidrológica en la subcuenca

Estaciones Pluviométricas seleccionadas dentro y vecinas a la subcuenca de Río Jicatuyo

<i>Estación Pluviométrica</i>	<i>Elevación [msnm]</i>	<i>Fecha de inicio</i>	<i>Fecha de última lectura</i>
Belén Gualcho	1600	15/08/1971	6/30/2001
Belén Lempira	900	26/06/1971	11/30/2001
Cololaca	730	01/01/1980	8/31/2005
Dulce Nombre de Copán	1120	29/06/1971	11/30/2001
El Tablón	930	01/11/1972	12/31/2006
Erandique	1150	01/01/1971	12/31/2006
Gualtaya	1000	30/06/1971	11/30/2006
La Campa (p) 8	1610	26/06/1971	11/30/2001
Lepaera (p) 9	860	05/03/1971	2/1/2001
Minas San Andrés (p) 10	1180	20/08/1971	11/30/2001
San José de la Montaña (p) 11	820	01/01/1971	12/31/2006
Santa Rosa de Copán (p) 12	1083	01/01/1971	12/30/2006
Ulapa (P) 13	340	25/08/1971	12/31/2006

Fuente: Registro de cada estación.

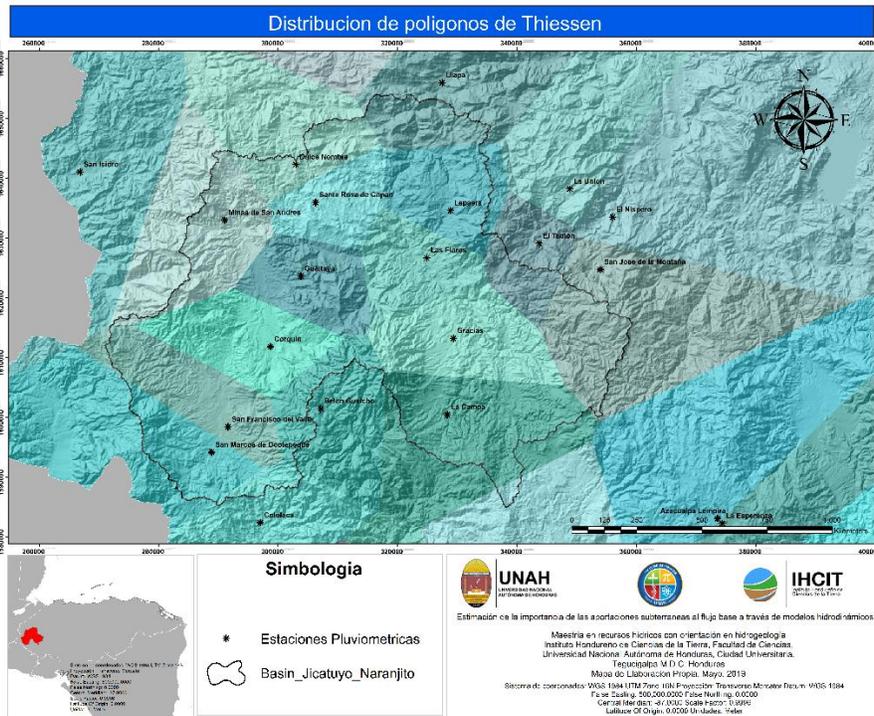


Ilustración 33 Mapa de áreas de influencia de cada estación dentro y próxima a la subcuenca
Fuente: Elaboración propia mediante el método de polígonos de Thiessen.

Todas las Estaciones presentan vacíos en sus registros, sin embargo, para poder elegir las más representativas desde el punto de vista espacial y con menos pérdidas de registros, se desarrollaron gráficas de continuidad a fin de considerar las épocas sin registros y las Estaciones con más datos disponibles (Gráfico No.9).

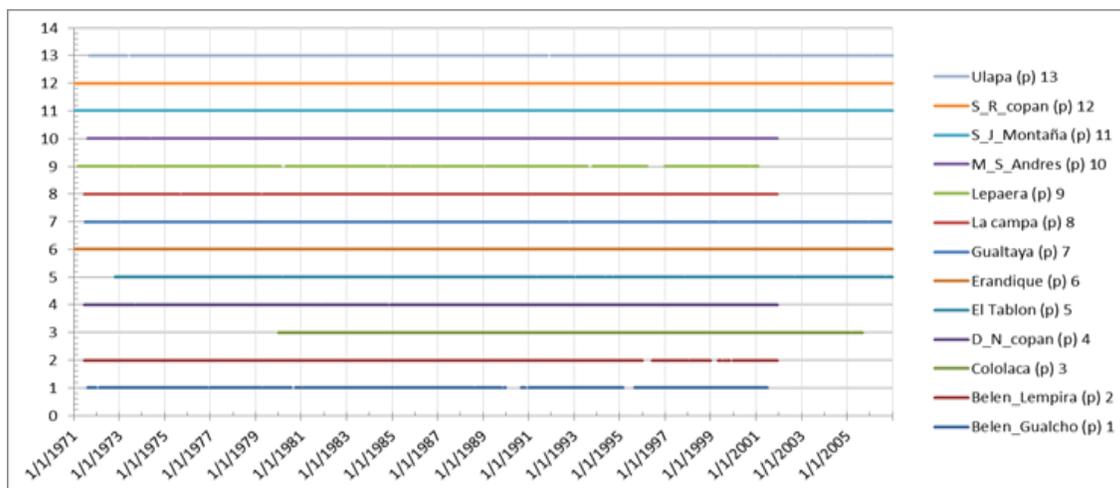


Gráfico 9 Gráfico de continuidad de las estaciones seleccionadas para el periodo 1971 - 2006.
Fuente: elaboración propia utilizando los registros de cada estación.

A partir de los registros y su continuidad, se seleccionaron como estaciones patrones las Estaciones: Ulapa, Santa Rosa de Copán, San José de la Montaña y Erandique. Estas cuatro

estaciones permitieron generar la Precipitación Media Diaria de cuenca. El gráfico No.10., muestra el hietograma de precipitación para la subcuenca.

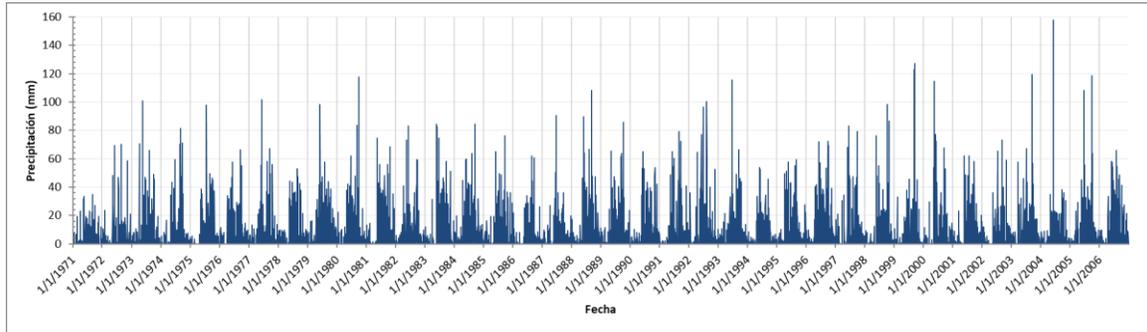


Gráfico 10 Precipitación media diaria de cuenca para el área de estudio en el periodo 1971 - 2006.
Fuente: Elaboración propia a partir de los registros de precipitación de cada estación.

6.2.Hidrometría Relaciones Escala-Caudal. Resumen de los caudales medios diarios

Para estimar la recarga del acuífero al río fue primero necesario estimar el caudal que entrega la subcuenca a la altura de la sección de aforo. para esto es esencial las estimaciones de caudal realizadas en las prácticas de aforos puntuales en la estación los cuales se relacionan con el nivel que presentan las aguas en el momento de aforo y mediante aproximaciones matemáticas se obtiene una ecuación de descarga válida para el periodo de a aforos (2000 – 2005). Esto permite la obtención de una serie de caudales para las épocas con que se cuenta con registros de nivel.

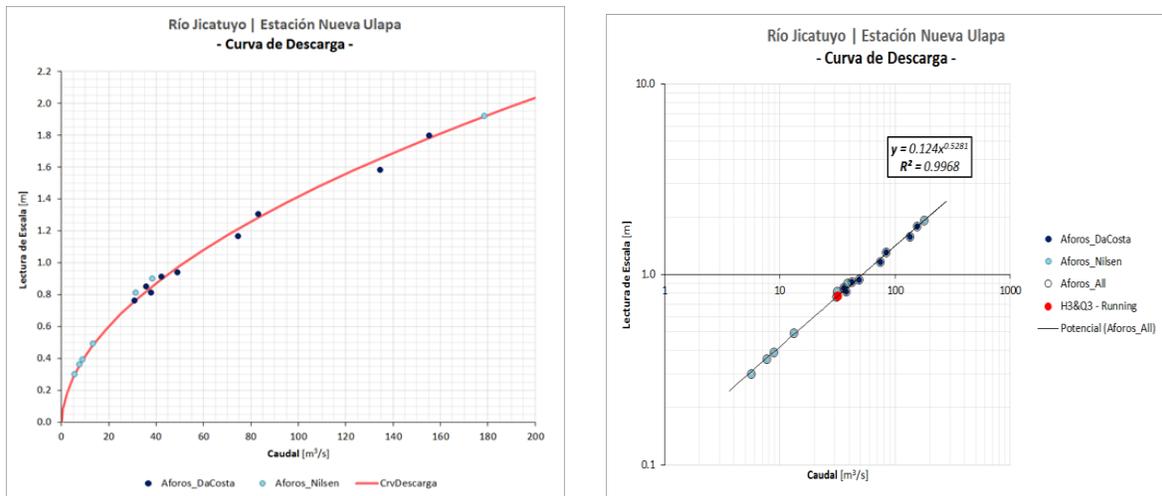


Gráfico 11 6 Curva de Descarga de la estación Ulapa para el periodo 2001-2008 (izquierda), Relación nivel de río - caudal (derecha).

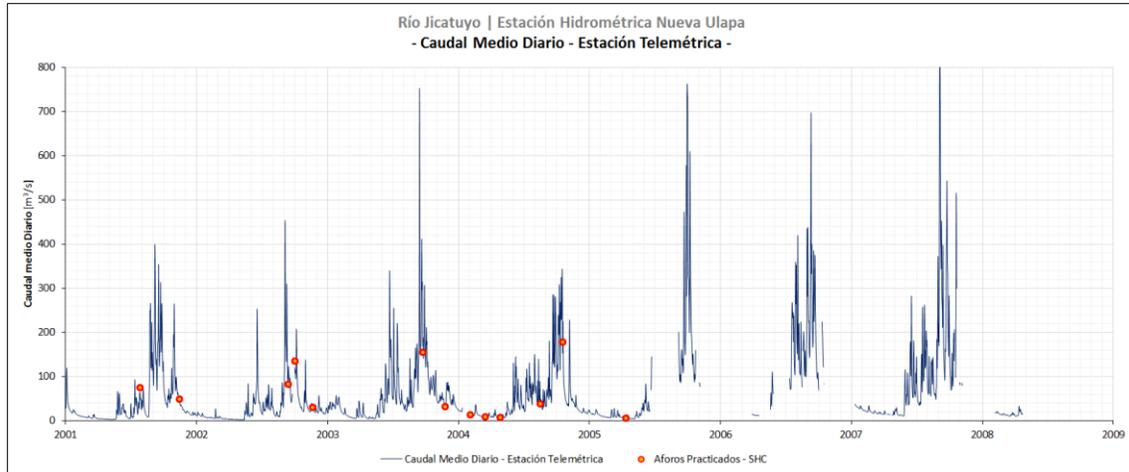


Gráfico 12 Hidrograma de caudales medios diarios en la estación hidrométrica Ulapa en el periodo 2001-2008.
Fuente Elaboración propia.
La línea azul indica la variación del caudal del río en el tiempo, los puntos rojos denotan los aforos de caudal practicados en la estación.

6.3. Estimación de factores climáticos para sustentar el modelo Lluvia-Escorrentía

Come se mencionó con anterioridad no existen muchas estaciones que cuenten con los registros necesarios, por lo que únicamente Ulapa y Santa Rosa de Copán fueron utilizadas para la estimación de las pérdidas por evapotranspiración según la ecuación Hargreaves (G. Hargreaves y Samani, 1983).

Tabla 11 Valores de la Evapotranspiración potencial utilizados para la subcuenca

Valores estimados de la Evapotranspiración Potencial [mm]

Estación	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	Anual
Ulapa	197.1	168.9	169.7	169.9	157.8	141.0	118.9	114.8	123.9	136.5	183.2	190.7	1872.5
Santa Rosa de Copán	151.9	129.9	128.6	128.0	119.1	107.8	88.4	84.0	91.5	104.3	142.6	152.8	1428.9

Fuente: Elaboración propia. Utilizando registros de temperatura de las estaciones.

6.4. Calibración de la información hidrometeorológica obtenida

Para la modelación se dispone del modelo HBV para la subcuenca del río Jicatuyo, el cual se calibró para el periodo 2001-2005. Debido a que existen una mayor continuidad en los datos hidro-meteorológicos hasta el mes de mayo 2005. El intervalo total de simulación con un paso de tiempo diario fue de 1971-2006. El modelo HBV considerado es el modelo estándar de tres cajas. La tabla No.12., indica los valores de los parámetros calibrados para este modelo.

Tabla 12 Parámetros utilizados para la modelación hidrológica.

No.	parametro	rango	valor
1	alfa	0.05 - 1	0.2
2	beta	1 - 4	1
3	cevpfo	0 - ∞	0.9
4	cflux	0 - 2	0
5	ecalt	0 - ∞	13
6	ecoor	0 - ∞	1
7	epf	0 - ∞	1
8	fc	100 - 2000	1300
9	hq	0 - ∞	2.11
10	k3	0 - 1	0.06
11	k4	0 - 1	0.06
12	khq	0.005 - 0.4	0.35
13	lp	0 - 1	1
14	maxbas	1 - 5	1
15	pcalt	0 - ∞	300
16	pcaltl	0 - ∞	600
17	pcoor	0 - ∞	1.5
18	perc	0 - 6	6
19	recstep	0 - ∞	999
20	soiltep	0 - 1	0.6

Fuente: Elaboración propia apoyado en el manual del modelo IHMS/HBV

Tras el procesamiento de la información y selección de los parámetros se procedió hacer una comparación entre los caudales observados y los computados buscando obtener los mejores estadísticos posibles. En esta ocasión el modelo utilizado fue calibrado con la información de la estación de aforos nueva Ulapa, los resultados se presentan en la gráfica No.13., siguiente.

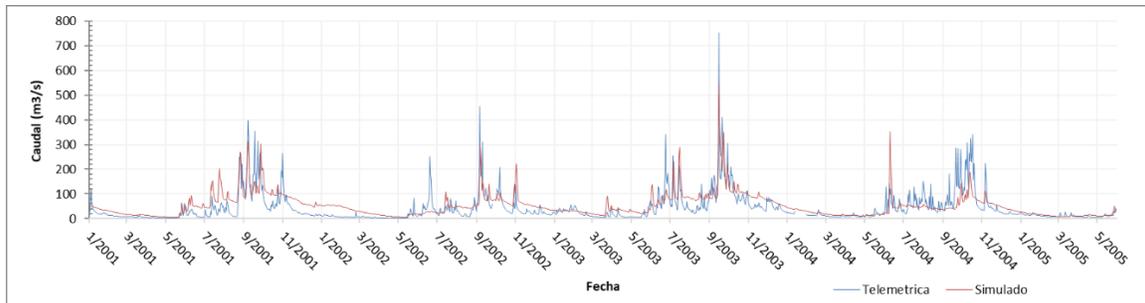


Gráfico 13 Caudales calibrados en la modelación periodo 2001-2005.

Fuente: Elaboración propia.

La línea azul muestra los caudales registrados en la estación hidrométrica Ulapa, mientras la línea roja indica los caudales simulados mediante el modelo IHMS/HBV para el mismo periodo de tiempo.

Igualmente, se proporciona en la tabla No.13., la diferencia acumulada de la escorrentía expresada en milímetros y el error medio, entre otros.

Tabla 13 Valores estadísticos propios de la modelación

Estadístico	Valor
R ²	0.555
Dif acumulada (mm)	55.200
Dif. Acumulación Relativa	0.12759
Error medio	0.560

En términos generales, los procesos que intervienen en el balance hídrico general han sido representados teniendo en cuenta la calidad de la información hidrometeorológica y los parámetros de entrada del modelo. A partir del modelo calibrado, se generó una serie continua de Caudales Medios Diarios desde 1971 a 2006. El espacio de tiempo generado y los valores observados se muestran en la gráfica No14. La gráfica, también muestra los valores de Lluvia Media de cuenca para el mismo periodo de simulación.

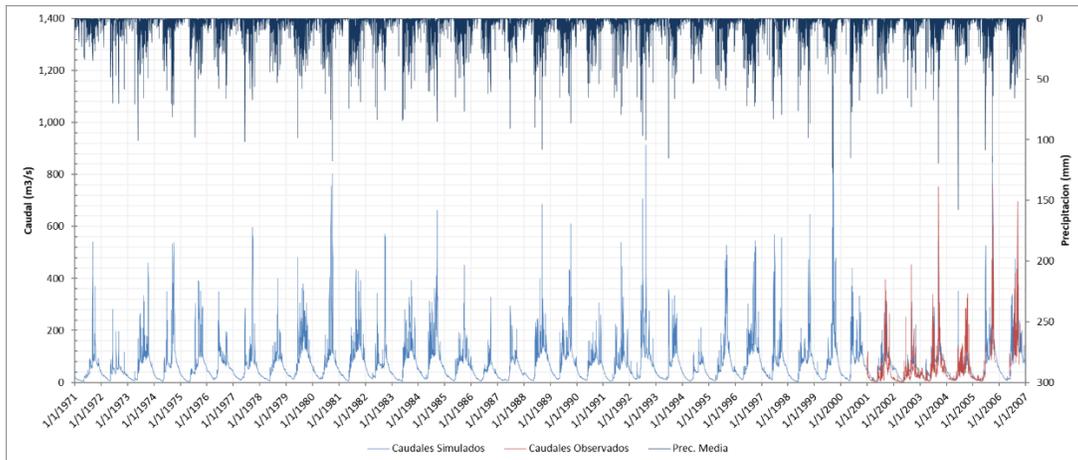


Gráfico 14 Hidrograma de caudales sintéticos medios diarios para el periodo de simulación 1971 - 2006.

Fuente Elaboración propia.

La línea azul oscura de la sección superior muestra la precipitación media de cuenca estimada mediante el método de Thiessen, la línea azul celeste indica el comportamiento de los caudales simulados y su correspondencia con las precipitaciones y la línea roja los caudales observados en la estación.

6.5. Análisis de aportaciones subterráneas

En esta sección se presentan los resultados de las diferentes técnicas de estimación de las aportaciones de agua subterránea.

6.5.1. Análisis de Curva de duración de frecuencia

En el contexto de las aportaciones subterráneas los caudales mínimos que se encuentra en los caudales excedidos un 95% (Q95%) se consideran como aportaciones subterráneas. La gráfica No.15 y la tabla No.14 muestran los valores obtenidos.

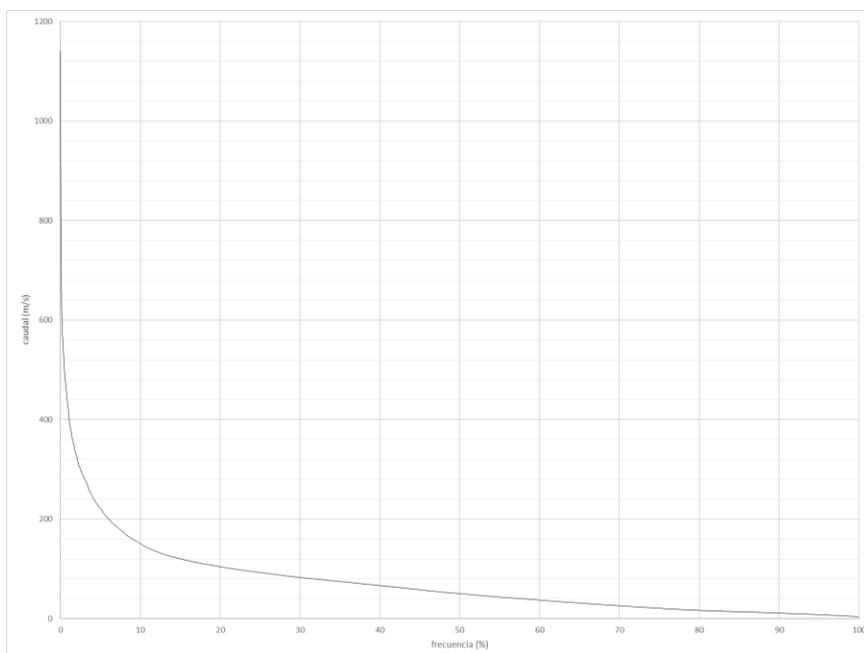


Gráfico 15 Curva de duración de frecuencia para la subcuenca para el periodo de simulación 1971-2006
Fuente: Elaboración propia

Tabla 14 Valores de caudales para diferentes frecuencias en la estación hidrométrica Ulapa periodo 1971-2006.

Frecuencia	Q5%	Q10%	Q15%	Q20%	Q25%	Q30%	Q35%	Q40%	Q45%	Q50%	Q55%	Q60%	Q65%	Q70%	Q75%	Q80%	Q85%	Q90%	Q95%
Caudal (m³/s)	221.4	150.8	120.5	104.4	92.8	82.8	74.6	66.6	58.3	50.4	43.5	37.3	31.4	25.8	20.9	16.7	14.0	11.3	8.2

Frecuencia	Q5%	Q10%
Caudal (m³/s)	221.4	150.8

Los valores de caudal muestra una alta variabilidad entre los caudales altos y bajo mostrando la relación directa que existe entre los regímenes climáticos y los aportes del río que van de más de 200 m³s⁻¹ hasta los 8 m³s⁻¹. En el caso de los ríos perennes, como lo es el Río Jicatuyo usualmente se estima el aporte subterráneo entre los percentiles 90 y 95% lo que correspondería a valores de aportación subterránea entre 11 y 8 m³s⁻¹

6.5.2. Análisis de recesión de los caudales

Considerando el periodo de estiaje de la subcuenca, se pudo evaluar la relación almacenamiento-descarga del sistema de manera directamente proporcional permitiendo una mayor seguridad de que los caudales proceden totalmente del sistema subterráneo.

Como se observa las aportaciones subterráneas presentan una variabilidad acorde a la cantidad de precipitación sucedidas para cada año, aunado a esto, el método no permite hacer una diferenciación entre lo que aporta el acuífero y lo que aporta la zona no saturada de la cuenca, esta última más susceptible a las variaciones de la precipitación.

Debido a esto, y buscando disminuir la variabilidad de las aportaciones subsuperficiales se aisló los años secos obtenidos del análisis climatológico que a su vez coincidían con el

ENOS de tal forma que se seleccionaron los años 1972, 1977, 1982, 1986, 1992, 1994, 1997, 2002. Y se estimó la curva de recesión maestra de la corriente del río. Se observa en la Gráfica 16., una mejor disgregación del componente basal con una variación que va de $\sim 30 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ al inicio de la época de estiaje a $\sim 4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ antes de las primeras lluvia del año hidrológico siguientes.

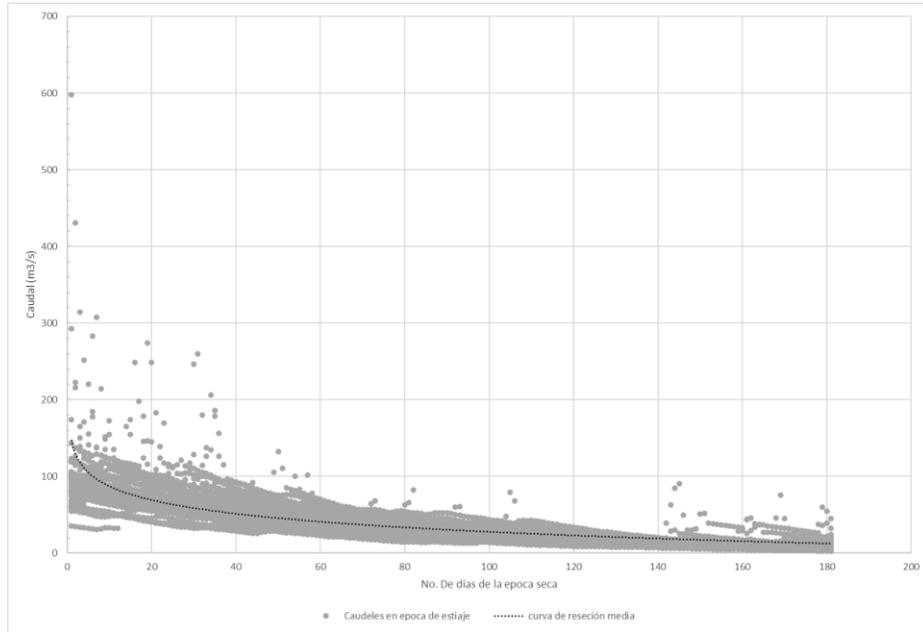


Gráfico 16 Curva de Recesión maestra para en la estación hidrométrica Ulapa.

Fuente Elaboración Propia.

El grupo de puntos indican los valores de caudal diario en la época seca de la subcuenca, mientras la línea punteada negra indica la curva promedios de recesión que estima de manera promedio el aporte subterráneo al flujo del río.

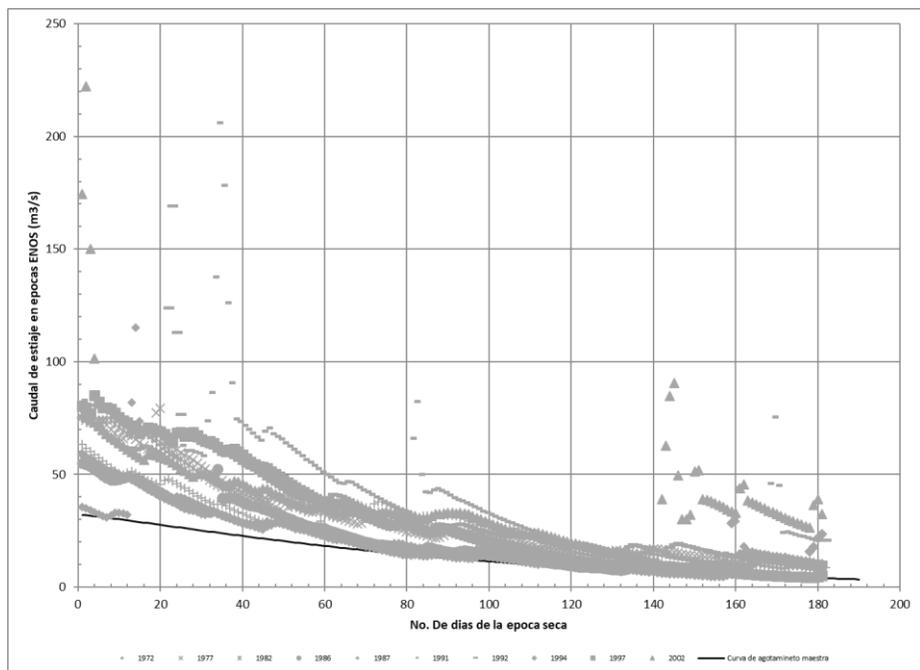


Gráfico 17 Curva de recesión envolvente en la estación hidrométrica Ulapa.

Fuente: Elaboración propia.

La línea continua negra muestra el aporte teórico mínimo del acuífero al caudal del río, obtenida a partir de los caudales de época seca pertenecientes a los años secos según clasificación climática utilizada.

6.5.3. Método del filtro recursivo digital

Este método como su nombre lo indica aplicar reglas preestablecidas que son recurrentes en el tiempo, este método busca la obtención de un índice de separación de caudales básicos basado en reglas fácilmente programables. Filtro recursivo de un parámetro

En este método se utilizó un valor de α igual a 0.925 el cual es el rango promedio del valor sugerido entre 0.90 y 0.95 (Gráfica No.18). Se aprecia que el método permite separar en una serie continua los valores de caudal y escorrentía directa permitiendo disgregar la curva de caudales clasificados mostrando de esta manera los caudales totales y basales en una distribución de frecuencia. La gráfica No.19., así mismo, muestra los diferentes valores que este una mayor dependencia del aporte subterráneo en el flujo total del río en donde el 79% del caudal es aporte subterráneo.

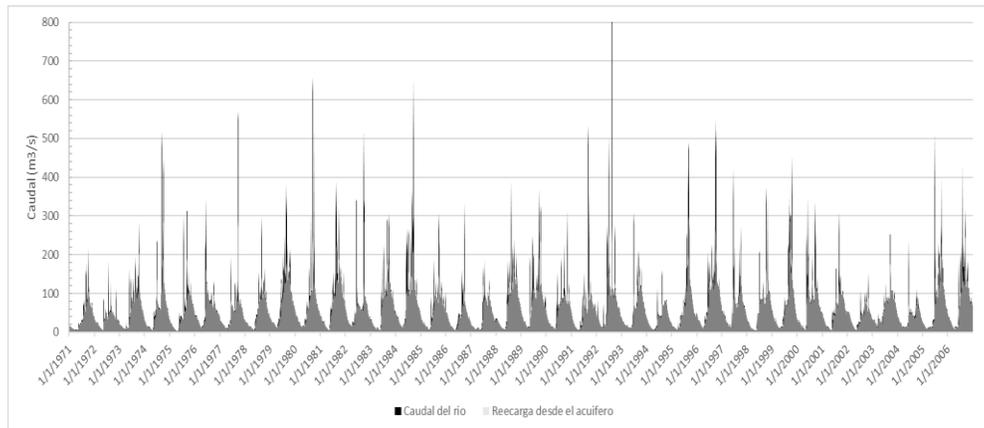


Gráfico 18 Hidrograma de caudales medios diarios y aportación subterránea.

Fuente: Elaboración propia.

El área gris muestra lo que según la metodología del filtrado corresponde al caudal proveniente de aporte subterráneo.

Tabla 15 Valores de caudal total y subterráneo para diferentes frecuencias

Frc %	Qttotal m3/s	Qbase m3/s
5	221.41	139.36
10	150.85	115.98
15	120.52	102.35
20	104.40	92.36
25	92.79	83.38
30	82.81	76.33
35	74.63	69.23
40	66.60	61.86
45	58.26	53.55
50	50.41	46.29
55	43.48	40.48
60	37.34	34.11
65	31.43	28.41
70	25.83	23.35
75	20.89	18.96
80	16.73	15.19
85	13.97	12.72
90	11.32	10.34
95	8.23	7.63

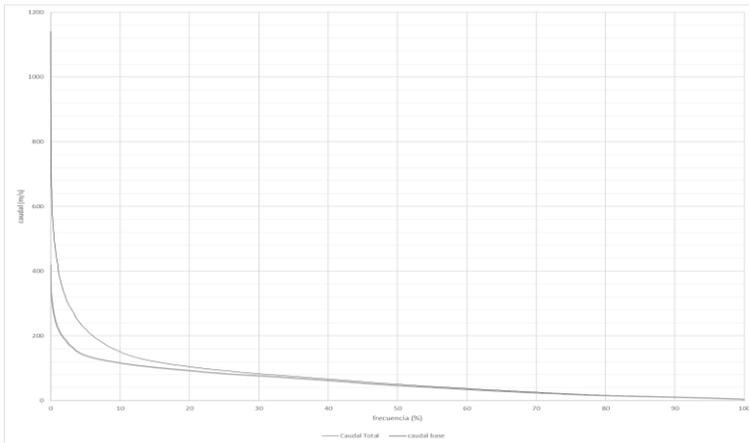


Gráfico 19 Curva de duración de frecuencia de caudal subterráneo.
Fuente: Elaboración propia

6.5.4. Filtro recursivo de doble parámetro

El método parte del mismo valor α en este caso 0.925, pero adicionalmente se usó el valor de índice de separación de caudal base máximo, en este caso se utiliza 0.80 el cual es recomendado para este tipo de río. Se observa en las gráficas No. 20 y 21., que esta metodología modifica el comportamiento de hidrograma con respecto al método de filtrado de un parámetro ampliando los rangos de los extremos. Aun así, el índice de caudal base disminuyó en 1% dejándolo en 78%.

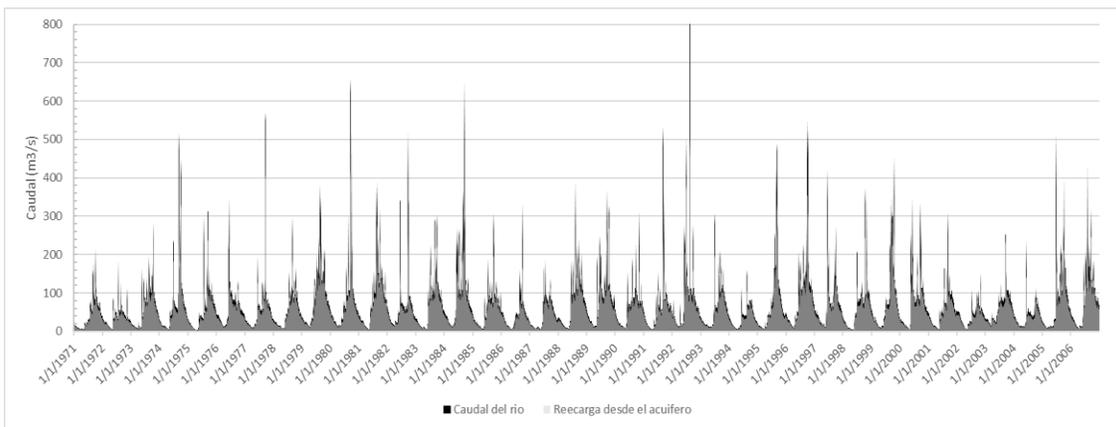


Gráfico 20 Hidrograma de caudales medios diarios y aportación subterránea.
Fuente: Elaboración propia.
El área gris muestra lo que según la metodología del filtrado corresponde al caudal proveniente de aporte subterráneo.

Tabla 16 Valores de caudal total y subterráneo para diferentes frecuencias

Frc %	Qttotal m3/s	Qbase m3/s
5	221.41	157.84
10	150.85	117.61
15	120.52	98.58
20	104.40	85.87
25	92.79	76.00
30	82.81	68.38
35	74.63	61.57
40	66.60	54.56
45	58.26	47.69
50	50.41	41.01
55	43.48	35.42
60	37.34	30.51
65	31.43	25.52
70	25.83	20.91
75	20.89	16.93
80	16.73	13.61
85	13.97	11.31
90	11.32	9.23
95	8.23	6.82

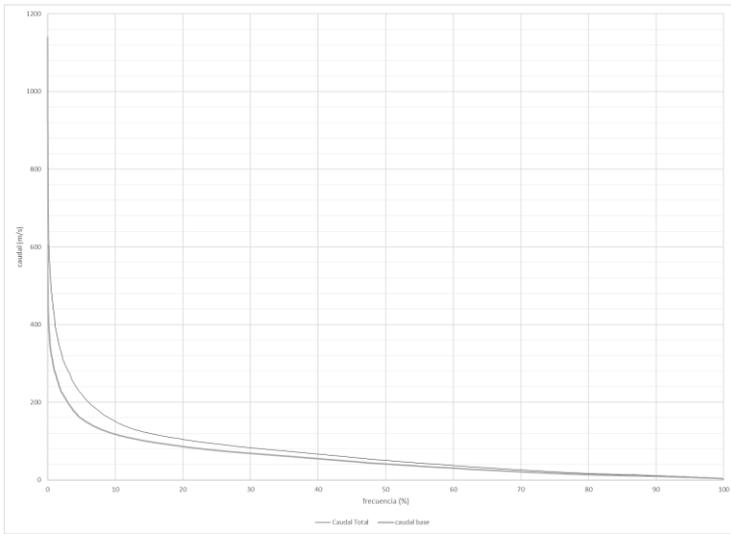


Gráfico 21 Curva de duración de frecuencia de caudal subterráneo
Fuente Elaboración propia.

6.6. Integración del modelo hidrológico

A partir de los resultados del modelo HBV y su facilidad para estimar dentro de grupo de parámetros de salida que posee este programa, se separó el flujo proveniente de tanque de almacenamiento inferior que en este caso sería el aporte del acuífero al caudal registrado en el río. La grafica No. 21 muestra los valores simulados del caudal total y el caudal subterráneo de la cuenca. Se observa la capacidad del modelo de simular el comportamiento del acuífero de la subcuenca de manera diaria, lo que permite estimar el aporte al caudal proveniente del aporte subterráneo mostrando variaciones de acuerdo con la época, que varía desde $143 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ en época lluviosa a $2.6 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ en época seca.

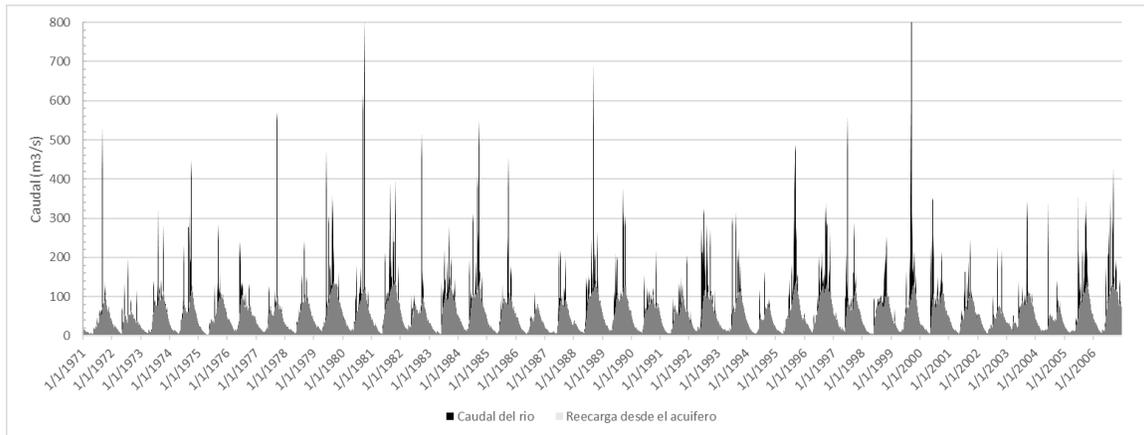


Gráfico 22 Hidrograma de caudales medios diarios y aportaciones subterráneas mediante modelo hidrológico.
Fuente: Elaboración propia.

7. CAPITULO VI: DISCUSIÓN

El estudio indirecto del sistema subterráneo a través de caudales superficiales mediante las diferentes técnicas utilizadas es una alternativa simplista, no obstante, adecuada cuando no se tienen datos suficientes para caracterizar la relación río-acuífero. La inclusión en los modelos hidrológicos de coeficientes que explican la comparación del componente subterráneo permite estimar bajo parámetros físicos las aportaciones de caudales de los acuíferos al río, de igual forma cuenta con la ventaja que obteniendo los valores que rigen los aportes en la relación río – acuífero se puede estimar en cuencas si información hidrométrica.

Con el fin de mostrar las potencialidades de cada metodología de separación de caudal base, la siguiente sección muestra el análisis comparativo entre las metodologías con respecto a caudales aportados del acuífero obtenidos de la modelación.

7.1. Comparación de Metodologías.

7.1.1. Curva de duración de frecuencia.

La curva de duración tanto para los caudales totales del río como para los caudales estimados de la recarga proveniente del acuífero (Gráfico No.23), muestra que el caudal base es de mayor importancia que la planteada con la primera metodología. Se observa que rápidamente el caudal que aporta el acuífero supera la escorrentía directa y subsuperficial. Es decir, por más de 329 días al año (90% del tiempo), más del 50% de caudal del río proveniente del caudal base.

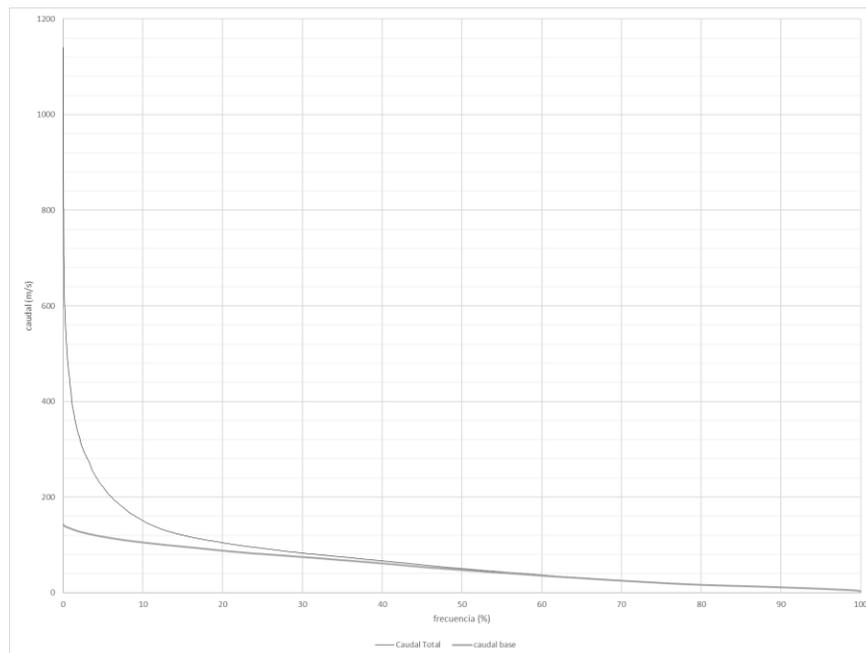


Gráfico 23 comparación entre el aporte subterráneo modelado y el valor del 95% de frecuencia.
Fuente: Elaboración propia.

El gráfico muestra la curva de duración de frecuencia (color negro) de los caudales totales medios diarios y la curva gris representa el comportamiento de las aportaciones subterráneas del acuífero.

7.1.2. Curva de recesión

El análisis de recesión permitió disgregar el comportamiento del acuífero en la época de estiaje. Esta característica es la que permite comparar las estimaciones realizadas entre la curva de recesión y las estimaciones de las descargas del acuífero generadas por el modelo. Para eso, se seleccionó de la información generada por el modelo en las épocas de estiaje que coinciden con el ENOS y se comparó con la curva de agotamiento anteriormente estimada.

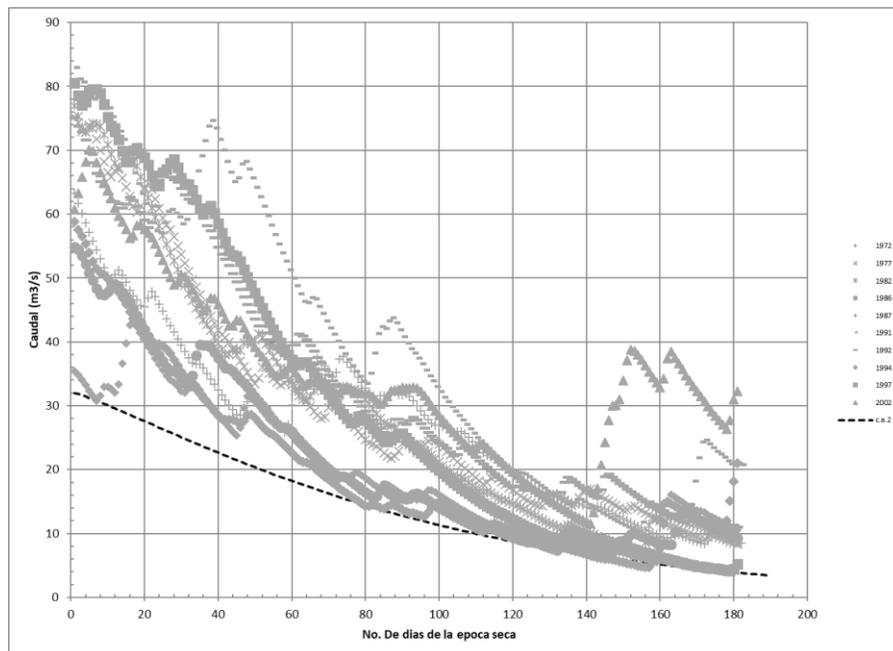


Gráfico 24 Aportaciones subterráneas estimadas mediante el modelado hidrológico en las épocas de estiaje.

Fuente: Elaboración propia.

Las curvas de color gris muestran el agotamiento de las aportaciones del acuífero y la línea negra la curva maestra de recesión determinada mediante el método de análisis de recesión.

De estos resultados, se puede apreciar que el caudal aportado por el acuífero es mayor al estimado mediante el análisis de recesión mostrando que los aportes tanto de la parte superficial y la subterránea depende de los montos de precipitación que se den en la época seca.

7.1.3. Métodos de filtrado

A través de las curvas de duración (Gráfico No.25), se compararon los valores de aportaciones subterráneas obtenidos entre el método del filtrado y las estimaciones del modelo hidrológico. Como se aprecia la mayor diferencia entre los valores modelados y los estimados con el método del filtrado se ubican en los valores inferiores al 15 percentil provocando que al estimar una mayor aportación con los métodos de filtrado el valor del

índice de separación de caudal base sea mayor en estos casos. La tabla No.17., resume los valores para diferentes percentiles.

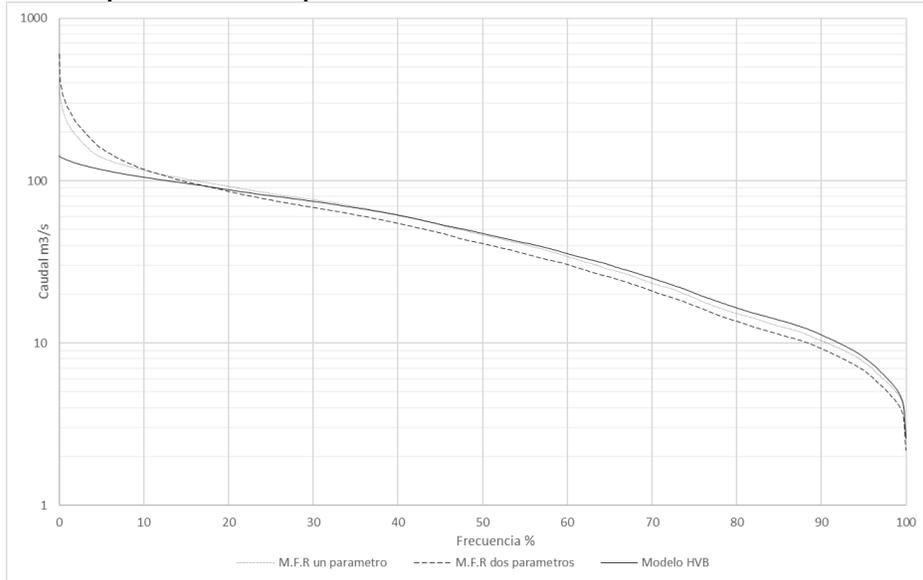


Gráfico 25 Curva de duración de frecuencia del aporte subterráneo mediante los métodos de filtrado recursivo y modelado hidrológico.
Fuente: Elaboración propia

Tabla 17 Valores de caudal subterráneo para diferentes frecuencias.

Frecuencia	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95
M.F.R un parametro	139.4	116.0	102.3	92.4	83.4	76.3	69.2	61.9	53.5	46.3	40.5	34.1	28.4	23.4	19.0	15.2	12.7	10.3	7.6
M.F.R dos parametros	157.8	117.6	98.6	85.9	76.0	68.4	61.6	54.6	47.7	41.0	35.4	30.5	25.5	20.9	16.9	13.6	11.3	9.2	6.8
Modelo HVB	117.1	105.0	96.3	87.9	80.8	74.6	68.1	61.3	53.7	47.3	41.3	35.5	30.3	25.1	20.3	16.5	13.8	11.2	8.2

Por su parte, la tabla No.18 indica el ICB. Resultante para las metodologías de filtrado y lo obtenido a partir de la modelación hidrológica.

Tabla 18 Valores de índice de separación de caudal base para cada una de las metodologías.

Metodología	BFI
M.F.R un parametro	0.79
M.F.R dos parametros	0.78
Modelo HVB	0.73

7.2. Análisis volumétrico

Como se pudo observar en la comparación de los diferentes métodos, el aporte subterráneo cuenta con una porción importante en el caudal total del río. Para poder considerar dicha importancia, se realizó un análisis de los diferentes aportes, subterráneo y superficial, cuantificando el volumen que representa tanto en lo proveniente de la lluvia y su contribución al caudal total escurrido.

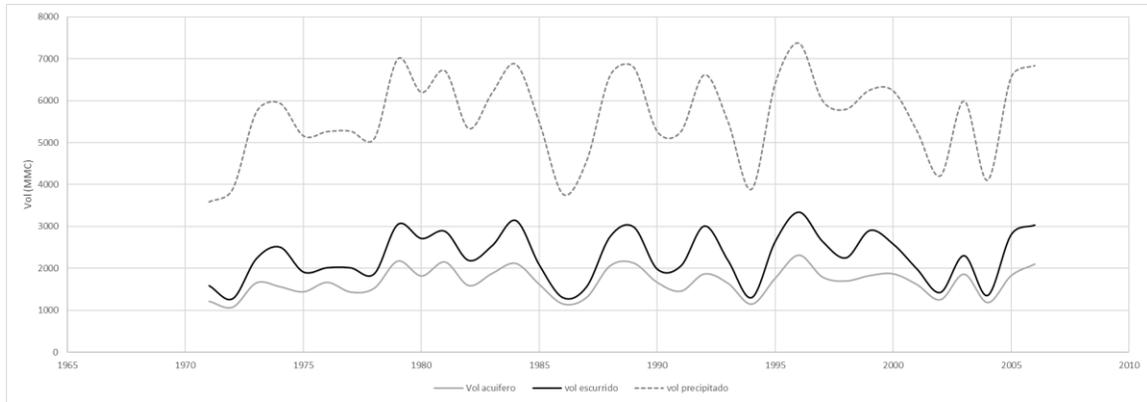


Gráfico 26 Volumen de agua en los diferentes estratos de recorrido de agua.
 Fuente Elaboración propia

De manera inmediata se observa que los caudales tanto los superficiales y los subterráneos varía de acuerdo al ciclo de lluvias en donde se sitúa la subcuenca. concluyendo que en la cuenca en promedio el volumen precipitado anual es de 5,368 MMC de esta cantidad el 41% corresponde a una respuesta rápida de la subcuenca, es decir, escorrentía superficial que corresponde a 2,291 MMC y un 30% pertenece al aporte subterráneo lo que equivale a 1,678 MMC los restante 29 % corresponde a procesos de evaporación y transpiración.

8. CAPITULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Se calibro el modelo HBV para el periodo 2001- 2005, a fin de reproducir la respuesta observada de la subcuenca del río Jicatuyo, a fin de poder generar una serie continua de caudales que permitan caracterizar el comportamiento hídrico en la subcuenca.
- El modelo escala de reproducir en escala diaria los caudales de rio, no obstante, sobre estima los caudales de estiaje en el año hidrológico 2001-2002, simulando de una mejor manera los años siguientes.
- El proceso de calibración ha conseguido simular con buen grado de aproximación el hidrograma medido para la subcuenca del río Jicatuyo, sin embargo, los resultados de la calibración no deberían considerarse como definitivos ni el proceso de modelización cerrado. Hay que considerar que la calibración se ha realizado partiendo de la precipitación total en la cuenca. No se ha tenido en cuenta la interceptación de la lluvia en el modelo que quedo enmarcada dentro de los montos de evaporación y traspiración.
- Hay que destacar que, en la búsqueda de la simulación de caudales, se debe saber elegir del modelo que pueda dar respuesta a la interrogante que se plantea, dado que al existir diferentes tipos de modelos hidrológicos y ya algunos no representan condiciones físicas del medio, si más bien, relaciones matemáticas entre sucesos, estos no podrían describir procesos intermedios a la generación de caudales de la corriente.
- Aunque la curva de duración de frecuencia puede describir el régimen hídrico de la subcuenca en este caso una subcuenca tropical con suelo permeables, no obstante, este método se muestra muy simple al momento de hacer una distinción de los caudales subterráneos subestimando dicha aportación, en donde se puede apreciar comparándolo con el modelado hidrológico que el caudal subterráneo comienza a tener mayor importancia a partir de 10% del tiempo, es decir, que en un año 11 meses son dominados por las aportaciones subterráneas del acuífero.
- La curva de recesión maestra describe de manera integral los procesos de almacenamiento de la subcuenca e indican la importancia que puede tener el aporte subterráneo al caudal total del río, el uso esta curvas puede ser de gran utilidad al momento de estimar los caudales bajos de un río para la planeación hídrica, sin embargo, esta se ve limitada al periodo de estiaje de la subcuenca, y en área tropicales donde la precipitación interrumpe el agotamiento de caudal superficial múltiples curvas se pueden obtener para una época determinada, así mismo, el método no puede identificar en acuíferos libres el aumento de las aportaciones subterráneas debido a la recarga del acuífero, lo que lleva a la subestimación de dicho aporte.

- El algoritmo de Lyne y Hollick y el modificado por Eckhardt se acopla bastante bien al hidrograma; el uso de un filtro 0.925 resulta una forma fácil y rápida de separar el aporte subterráneo y tanto el método de un parámetro y el de dos parámetros se encuentran muy próximos, ambos arriba de 0.70 de ICB. Lo que indica un flujo subterráneo importante. No obstante, el método presenta debilidades al momento de ser utilizado pues exige una serie de caudales sin vacíos en su información, algo que en la realidad del sistema de información del país es muy común.
- El método propuesto de separación del caudal empleando las salidas del modelo HBV/IHMS da como resultado un ICB de 0.73. Este valor es muy similar al obtenido para esta misma cuenca por el método de filtrado 0.79 y 0.78, por lo que se puede considerar el método propuesto como válido para la separación del caudal en sus diferentes componentes.
- Una ventaja importante en la aplicación del modelo hidrológico para la determinación del caudal subterráneo presenta la ventaja que permite, en primer lugar, utilizarlo de una forma más conservadora en cuencas no instrumentadas, así mismo, el modelo se puede trabajar en una forma semi-distribuida al dividir la subcuenca en microcuencas y zonificarla en términos de elevación.
- En nuevas líneas de investigación la aplicación de un modelo de flujo subterráneo, como MODFLOW, en un acuífero de la subcuenca a partir del cual sea posible la caracterización de las aportaciones subterráneas. En tal caso, el acuífero estudiado deberá contar con una estación de aforo que permita comparar y validar los datos correspondientes al modelo, además de cumplir las condiciones físicas necesarias para este estudio de igual forma de contar con los datos mínimos para la generación de las principales condiciones de contorno e iniciales.
- La ampliación del estudio a otras subcuencas permitiría un estudio más contrastado sobre las diferentes geológicas, topográficas y climáticas tanto en las aportaciones subsuperficiales, como en la relación entre aportaciones subterráneas y superficiales mediante el ICB.
- Estimación del ICB para diferentes cuencas puede definir las aportaciones subterráneas permitiendo la generación de un filtro recursivo local para la separación del caudal base.
- Estudios puntuales con trazadores en zonas determinadas permitirían el mejor conocimiento de la fracción de agua infiltrada y su relación con las aportaciones subterráneas.

BIBLIOGRAFÍA

- Arnild, J. G., & Allen, P. M. (1999). AUTOMATED METHODS FOR ESTIMATING BASEFLOW AND GROUND WATER RECHARGE FROM STREAMFLOW RECORDS . *JOURNAL OF THE AMERICAN WATER RESOURCES ASSOCIATION* , 411-424.
- Bergstrom, S. (1976). Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments. *SMHI RHO* 7, 134.
- Bergstrom, S. (1995). The HBV model, computer models of watershed hydrology. *Water Resources Publications*.
- Beven, K. J. (1989). Interflow in: morel-Seytoux. *Unsaturated flow in hydrologic modeling: Theory and practice.*, 191-219.
- Beven, K. J., & Germann, P. F. (1982). Macropores and water flow in soils. *Water Resour. Res* 18,, 1311-1325.
- Brutsaert, W. y. (1977). *Regionalized Drought Flow Hydrographs From Mature Glaciated Plateau*. *Water Resour. Res.*, 13, 637-643.
- C. T. Main y ENEE. (1984). *Actualización del Inventario del Potencial Hidroeléctrico de Honduras*. Tegucigalpa.
- Cavelier, J. (1991). El ciclo del agua en los bosques montanos. *Boaques de Niebla de Colombia*, 69-83.
- Chapman, T. G., & Maxwell, A. (1996). Baseflow separation. Comparison of numerical methods with tracer experiments. *23rd Hydrology and Water Resour. Symposium*, 539-545.
- Chow, V. T. (1964). *Handbook of Applied Hydrology*. New York: McGraw-Hill.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Hidrologia aplicada*. Santa fé, Bogotá, Colombia: McGRAW-HILL.
- Consortio Harza–Cinsa. (1979). *Plan Maestro de Control de Avenidas en el Valle de Sula*. San Pedro Sula.
- Custodio, E., & Llamas, M. R. (2001). *Hidrologia Subterránea*. Barcelona: Ediciones Omega.
- de Fina, A. L., & Ravello, A. C. (1993). *Climatología y Fenología Agrícolas*. Buenos Aires, Argentina: Editorial Universitaria de Buenos Aires.
- Dingman, S. L. (2001). *Physical hydrology*. New Jersey: Prentice - Hall.
- Diskin, M. H. (1970). Definition and uses of the linear regression model. *Water Resours Research* 6., 1668-1674.
- Dunne, T., & Black, R. (1970). An experimental investigation of runoff production in permeable soils. *Water Resour. Res.* 6, 478-490.
- Eckhardt, K. (2005). How to construct recursive digital filters for baseflow separation. *HYDROLOGICAL PROCESSES Hydrol. Process.* 19, 507-515.
- ESA Consultores. (2012). *Evaluación de Impacto Ambiental de las Centrales Hidroeléctricas Los Llanitos y Jicatuyo - Línea de Base en Época de Verano*. Tegucigalpa.
- Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. New jersey: Prentice-hall.
- Frohlich, K., Frohlich, W., & Wittenberg, H. (1994). Determination of groundwater recharge by baseflow separation. Regional analysis in North–East China. *IAHS Publ.* 221, 69-75.

- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1982). Estimating potential evapotranspiration . *Journal irrigation* , 225-230.
- Hewlett, J. D., & Hibbert, A. R. (1967). Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. *Proc. Int. Symp. on Forest Hydrology*, 275-290.
- Horton, R. E. (1933). The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Trans. Am. Geophys. Union* 14, 446-460.
- Karamouz, M., Nazif, S., & Falahi, M. (2013). *Hydrology and Hydroclimatology Principles and Applications*. Boca Raton, FL: Taylor & Francis Group.
- L.M., T. (1995). A review of baseflow recession analysis. *Journal of Hydrology*, 349-370.
- Larkin, R. G., & Sharp, J. M. (1992). *On the relationship between river-basin geomorphology, aquifer hydraulics, and ground-water flow direction in alluvial aquifers*. . GSA Bulletin ; 104 (12): 1608–1620. Retrieved from On the relationship between river-basin geomorphology, aquifer hydraulics, and ground-water flow direction in alluvial aquifers. GSA Bulletin ; 104 (12): 1608–1620: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1992\)104<1608:OTRBRB>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1992)104<1608:OTRBRB>2.3.CO;2)
- Linsley, R. K., Kohler, M. A., & Paulhus, J. L. (1982). *Hidrologia para ingenieros*. Madrid: McGraw-hill.
- Lyne, V., & Hollick, M. (1979). Stochastic Time Variable Rainfall Runoff Modeling. *Hydrology and Water Resources Symposium*, 89-92.
- Mckee, T. B., Doesken, N. ..., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scale. *American Meteorological Society*, 179-184.
- Mulligan, M. (2005). «Laboratory Simulation of Cloud interception by Epiphytes and implication for Hidrology of the Tambito Experimental Cloud Forest, Colombia. *Journal of Hydrology*., 853-858.
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual model. *J. Hydrology* 10, 282-290.
- Nathan, R. J., & McMahon, T. A. (1990). Evaluation of Automated Techniques for Base FLOW and Recssion Analyses. *Water Resources Research*, 1465-1473.
- Organización Meteorológica Mundial. (2012). *Guía de Precaticas hidrologicas*. Ginebra.
- Organizacion Meteorológica Mundual. (1990). *Hydrological Models for Water Resources System Design and Operation*. Ginebra: Operational Hydrology Report No. 34, WMO-No. 740.
- Peters, E. y. (2005). Separation of base flow from streamflow using groundwater levels. *Hydrological Processes*, 921-936.
- Raghunath, H. M. (2006). *Hydrology Principles. Analysis. Desing*. New Delhi : NEW AGE INTERNATIONAL (P) LIMITED, PUBLISHERS .
- Rogers, R. D. (2019, mayo 20). *The University of Texas at Austin*. Retrieved from <https://repositories.lib.utexas.edu/handle/2152/889>
- Rollenbeck, R., Fabian, P., & Bendix, J. (2006). Precipitation dynamics and chemical properties in tropical mountain forests of Ecuador. *Advance in Geosciences*, 73-76.
- Rosenblueth, A. (1971). *El método Científico*. Mexico D.F: La prensa Medica Mexicana S.A de C.V.
- Salinas Nuñez, A. S. (2002). *Manual de Referencias Hidrologicas*. Tegucigalpa: Fondo Hondureño de Inversion Social.
- SERNA y UNAH. (2014). *Evaluación del Recurso Hídrico en su Régimen Natural*. Tegucigalpa.

- Simmons, C. S. (1969). *Los suelos de Honduras*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Singh, K. P., & Stall, J. B. (1971). Derivation of baseflow recession curves and parameters. *Water Resour Res.*, 292-303.
- Skalash, M. G. (1990). Environmental isotope studies of storm and snowmelt runoff generation. *Process studies in hillslope hydrology*, 401-435.
- Sklash, M. G., & Farvolden, R. N. (1979). The role of groundwater in storm runoff. *J. Hydrol.*, 43-65.
- Sloto, R. A., & Crouse, M. Y. (1991). *A computer method for estimating ground-water contribution to streamflow using hydrograph separation techniques*. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 90-4162.
- SMHI. (2005). *Integrated Hydrological Modelling System Manual*.
- Thiessen, A. H. (1911). PRECIPITATION AVERAGES FOR LARGE AREAS. *MONTHLY WEATHER REVIEW*.
- Tobón, C. (2009). *Los bosques andinos y el agua*. Quito, Ecuador: Programa Regional ECOBONA-INTERCOOPERATION, CONDESAN.
- Ward, R. C. (1984). On the response to precipitation of headwater streams in humid areas. *Journal Hydrology*, 179-189.
- Wittenberg, H. (1999). Baseflow recession and recharge as nonlinear storage processes. *Hydrol. Process. Special Issue Process Interactions in the Environment*. 13, 715-726.
- Zúniga Andrade, E. (1989). *La estructura y el comportamiento de la atmosfera, aplicacion de su estudio a la aviación, a la agricultura y a la ingeniería*. Tegucigalpa: CETTNA.