

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA ORIENTAL
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA
SECCIÓN DE FÍSICA



TEMA DE INVESTIGACIÓN:

DIAGNÓSTICO HIDROLÓGICO DE MICROCUENCA TRANSFRONTERIZA RÍO

OLOMINAS, MORAZAN

PRESENTADO POR:

LEONEL ERNESTO MÉNDEZ GUTIERREZ

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

LICENCIADO EN FÍSICA

DOCENTE DIRECTOR:

RAFAEL CAYETANO CARTAGENA

DOCENTE ESPECIALISTA:

CÉSAR ARMANDO ALVARADO BATRES

CIUDAD UNIVERSITARIA ORIENTAL. NOVIEMBRE 2019

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

AUTORIDADES

MAESTRO ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

RECTOR

RAÚL ERNESTO AZCÚNAGA LÓPEZ

VICE - RECTOR

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN

SECRETARIO GENERAL

LIC. RAFAEL HUMBERTO PEÑA MARTÍN

FISCAL GENERAL

FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA ORIENTAL

AUTORIDADES

LIC. CRISTOBAL HERNÁN RÍOS BENÍTEZ

DECANO

LIC. OSCAR VILLALOBOS

VICE-DECANO

MSC. ISRAEL LÓPEZ MIRANDA

SECRETARIO

JEFE DEL DEPTO. DE CC. NN. Y MATEMATICA

LIC. BLANCA MIRIAN RAMOS DE ROSALES
COORDINADORA DE LA SECCIÓN DE FÍSICA

LIC. RAFAEL CAYETANO CARTAGENA MARTINEZ
ASESOR PRINCIPAL

JURADO CALIFICADOR

LIC. RAFAEL CAYETANO CARTAGENA MARTINEZ
M.SC. CÉSAR ARMANDO ALVARADO BATRES
LIC. TELMA ELIZABETH JIMÉMEZ MURILLOS

AGRADECIMIENTOS

Quiero aprovechar este espacio para agradecer a todas las personas que hasta el día de hoy han colaborado en mi formación; No solo como profesional, también como persona, especialmente quiero agradecer al Lic Rafael Cartagena que me apoyo en los momentos más difíciles de mi formación, me dio el apoyo que necesitaba y me dio la motivación que me hacía falta cuando estaba a punto de rendirme antes las dificultades de la carrera y de la vida; Hasta hoy en día lo considero un segundo padre que medio lo que yo necesitaba sin pedir algo a cambio simplemente que pasara la cadena de hacer el bien a los que lo necesitan. Quiero agradecer a los licenciados que me enseñaron la lección que para mí es la más importante de la vida universitaria. “En la universidad aprendemos a aprender”

Hoy en día agradezco contar con el apoyo de mi familia especialmente a mi hermana Karina Benítez que siempre me apoyo en todas las decisiones que he tomado, fueran buenas o malas, al final de cuenta son las decisiones las que forman nuestro camino y la actitud con la que tomamos el resultado de nuestras acciones define nuestra felicidad.

Durante mi proceso de tesis tuve la buena fortuna de trabajar en CIAC- Morazán y conocer a personas como al Lic. Adrián Mayen que en ese momento también pasaba por su proceso de tesis, siempre estuvo dispuesto a ayudarme en lo que necesitara, hoy en día lo considero un amigo incondicional y un gran profesional en su rama.

Agradezco a la buena fortuna que tuve de conocer al M. Sc. Cesar Alvarado Batres en una de las instancias menos esperadas y graciosas, me ofreció la oportunidad de trabajar con él; Además de esos me considero un amigo y me considero en diferentes proyectos que hasta hoy en día me han ayudado mucho en mi vida profesional y que a la vez han dado un rumbo específico a mi carrera; mostrándome que hay una oportunidad más allá de la docencia en nuestro país.

Durante mi calidad de egreso conocí a un par de personas que cambio mi perspectiva sobre la vida profesional y las infinitas posibilidades que ofrecen las profesiones en Ciencias Naturales, el M. Sc. Samuel Álvarez y la M. Sc. Xochilt Pocasangre. Con el rigor que se le solicita a un científico me corrigieron y contribuyeron para que la calidad del trabajo que aquí se presenta no sea solo un trámite más que haya que cumplir para obtener mi grado de licenciado.

Otra persona que colaboro mucho a la calidad de este trabajo fue el M. Sc. José Ney Ríos, quien me dio el empujón que necesitaba para introducirme en el mundo de la hidrología.

Finalmente quiero agradecer a esas personas que me apoyaron mostrándome sus perspectivas y opiniones, mis compañeros de trabajo en CIAC a los colegas de la universidad que también me daban su confianza. Especialmente al Lic. Víctor Villalta, un gran amigo que me apoyo mucho moralmente en momentos difíciles.

DEDICATORIA

Este trabajo es gracias al apoyo de muchos y propio; no es justo dedicarlo a alguien en especial; Por eso dedico este esfuerzo a todos los que me han apoyado desde el principio, desde a mitad y desde el final. Las personas más influyentes son a las que entrego mis agradecimientos y dedico los resultados de este trabajo.

Lic Rafael Cartagena

M. Sc. Cesar Alvarado Batres

Lic. Adrian Mayen

M. Sc. Samuel Alvarez

M. Sc. Xochilt Pocasangre

Dedico este trabajo a mi familia y amigos por llevarme a ser la persona que soy hoy en día.

Quiero dedicar este trabajo mi nueva familia Mirian Guadalupe, mi compañera de vida y la futura madre de mi hijo.

“Espero que estés leyendo esto y que veas que puedes lograrlo no importa lo difícil que parezca, todo lo podrás lograr si te lo propones. Confío completamente en ti. Nunca te rindas”

INDICE GENERAL

Resumen	1
INTRODUCCIÓN.....	2
CAPITULO I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.1 Formulación del problema	6
1.1.1 Pregunta general.....	6
1.1.2 Preguntas específicas	6
1.2 Antecedentes	6
1.3 Justificación	7
1.4 Limitaciones.....	8
1.5 Objetivos	8
CAPITULO II MARCO TEORICO	9
2.1 Ciclo Hidrológico.....	9
2.1.1 Acuíferos.....	10
2.1.2 Cuenca hidrológica	12
2.1.3 Cuenca hidrográfica	13
2.1.4 Cuencas Transfronterizas	13
2.1.5 Clasificación de cuencas hidrográficas	14
2.2 Balance Hidrológico	15
2.2.1 Variables del Balance Hídrico	16
2.2.2 Unidades medidas en estaciones meteorológicas.....	17
2.2.3 Variables Generadas por SWAT	18

2.3 Geomorfología	22
2.3.1 Parámetros geomorfológicos.....	24
2.4 Diagnóstico hidrológico de una microcuenca	29
2.5 Herramientas para la modelación hidrológica.	29
2.6 Índices de imágenes	32
2.6.1 Índice NDVI.....	33
CAPITULO III METODOLOGIA.....	34
3.1 Ubicación de la investigación	34
3.2 Técnicas e instrumentos de medición	34
3.3 Geomorfológico	35
3.4 Metodología de diagnóstico hidrológico.....	37
3.5 Metodología de diagnóstico cambio de vegetación	39
3.6 Análisis de datos	40
CAPITULO IV PRESENTACION DE RESULTADOS	41
4.1 Resultados geomorfológicos	41
4.2 Resultados hidrológicos	43
4.3 Resultados de cambio de vegetación	46
4.4 Compilación de problemas de la microcuenca del río Olominas.....	46
CAPITULO V DISCUSIÓN DE RESULTADOS	52
5.1 Análisis geomorfológico	52
5.2 Análisis balance hídrico	53
5.3 Analisis cambio de vegetación	55
5.4 Análisis de problemas detectados en la microcuenca del río Olominas	55

CAPÍTULO VI CONCLUSIONES	56
Bibliografía	58
ANEXOS	62
Anexo 1	62
Anexo 2	63
Anexo 3	64
Anexo 4	65
Anexo 5	66
Anexo 6	67

INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. 1 Delimitación de microcuenca del río Olominas y sus tributarios. De gris se muestran os municipios de El Salvador que comparten territorio con la microcuenca y el punto rojo muestra la ubicación de la única población que habita dentro de la microcuenca.....</i>	<i>4</i>
<i>Figura 2. 1 Ciclo Hidrológico, modificado de (Introducción al Ciclo Hidrológico 2010)</i>	<i>9</i>
<i>Figura 2. 2 esquema acuífero confinado y no confinado de distribución de aguas (Mascareño 2016).....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 2. 3 Esquema de dos acuíferos colgados (Universidad Complutence de Madrid s.f.).</i>	<i>11</i>
<i>Figura 2. 4 Esquema de cuenca hidrológica (Watler 2017).....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 2. 5 Modelo 3D de una cuenca Hidrográfica (Po Chi Fung 2018).....</i>	<i>13</i>

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. 1: oferta y demanda hídrica, modificada de (Plan de Ordenamiento Del Recurso Hídrico Del Municipio De Perquín 2016)</i>	5
<i>Tabla 2. 1: Clasificación de Cueva, Subcuenca y Microcuenca, modificado de (J. Faustino, F. Jiménez 2000)</i>	15
<i>Tabla 2. 2: Variables de balance hídrico (Uribe 2010)</i>	17
<i>Tabla 2. 3: Componentes del coeficiente de infiltración</i>	20
<i>Tabla 4. 1: Análisis de problemas para gestión de microcuenca del río Olominas</i>	40

Resumen

La microcuenca transfronteriza del río Olominas sirve como fuente de abastecimiento de agua potable el municipio de Perquín, está ubicada en los municipios de Perquín, Arambala y Joateca al norte de Morazán, El Salvador y en el sur del municipio de Yarula en Honduras, debido a su importancia para el municipio de Perquín, se vuelve necesario realizar un diagnóstico hidrológico para mejorar la gestión hídrica de la microcuenca, durante la investigación se analizó la geomorfología usando los parámetros planteados por Horton (1932-1945) y Shumm (1956), la vegetación saludable con la ayuda de imágenes satelitales Landsat 8 para calcular el índice de vegetación normalizada (NDVI) y comprar el mismo índice en diferentes años y así observar cambios en la salud de la vegetación; Se calculó el balance hídrico de la microcuenca como resultado se obtuvieron los valores de las variables de entrada y salida del ciclo hidrológico; Se graficó el comportamiento de las precipitaciones, caudales y temperaturas utilizando el programa SWAT como una herramienta de modelación hidrográfica con una serie de datos 1979-2014, la geomorfología indica que la microcuenca muestra baja retención de agua, propiedad que fue corroborada por el balance hídrico, solamente el 32% del agua recibida puede ser retenida, debido a su terreno accidentado, con una densidad de drenaje que indica que es ligeramente impermeable; Además se muestra un cambio de vegetación de un 12.46 % desde 2014 al 2018, finalmente con los resultados obtenidos se detecta un descenso en la disponibilidad de agua, disminución en caudales máximos, peligro de inundaciones y alteración en la vegetación saludable de la microcuenca transfronteriza del río Olominas, finalmente se muestran las deficiencias con las que tiene que tratar la municipalidad de Perquín y todos los actores que dependen del recurso de dicha microcuenca.

INTRODUCCIÓN

El diagnóstico hidrológico es un factor importante para la gestión de una cuenca hidrográfica, dado que aporta información necesaria para identificar fortalezas y debilidades de la cuenca (Faustino y Jiménez 2000), El agua es recurso indispensable en una sociedad, es derecho de las comunidades tener acceso al agua (ONU 2010), las personas que comparten la misma fuente de abastecimiento deben estar informados acerca de el estado y la calidad del agua que comparten. El municipio de Perquin del departamento de Morazán no contaba con informacion tecnica respecto a su fuente de abastecimiento hídrico, por ende tampoco es consciente los peligros y amenazas a los que podria estar enfrentandose. El proposito proposito de esta investigacion es identificar posibles problemas que puede presentar la microcuenca del río Olominas la cual abastece de agua al casco urbano del municipio de Perquin y uno de sus caserios mas grandes Rancho Quemado. Se realizo un diagnóstico hidrológico para describir la cuenca y sus características hidricas, geomorfologicas y biofísicas, realizando balance hidrico con el modelo hidrológico SWAT; calculando parametros geomorfologicos de la microcuenca que luego ayudan a la descripcion de las características de ella según su forma, y mostrar una comparacion en la vegetacion de la cuenca desde el 2010 hasta el 2018, toda este informacion puede resultar informacion relevante para la municipalidad desde el punto de vista hidrico hasta el punto de vista de proteccion y uso de suelos, las herramientas que se utilizarán para esta investigacion incluye, QGIS, SWAT, SoilGrids, SPAW, imágenes satelitales del satelite Landsat8, todas estas herramientas son de acceso libre.

CAPITULO I PLANTEAMIENTO DEL

PROBLEMA

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El Salvador cuenta con 11 cuencas hidrogeológicas principales que abarcan todo el territorio nacional, siendo la cuenca del río Lempa la más grande en todo el país. Según la Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa 2015 (CEL), la cuenca del Río Lempa cuenta con una área de 18,240 Km² la cual se distribuye en los países de El Salvador, Honduras y Guatemala. Unos 10,215 Km² aproximadamente el 56 % de esa área se encuentra en El Salvador. En el Oriente del El Salvador predominan las cuencas de Río Lempa, cuenca del río Grande de San Miguel, cuenca del río Sirama y la cuenca del río Goascoran. La subcuenca más grande dentro de la cuenca Río Lempa es la subcuenca del río Torola, cuenta con una área de aproximadamente 1420 Km², siendo la subcuenca más grande del lado Este de El Salvador que contribuye a la cuenca del Río Lempa. Dentro de la subcuenca se puede identificar la microcuenca del Río Olominas (Llamada así por su río principal) de unos 29 Km² ubicada en los municipios de Perquín, Arambala y Joateca en el departamento de Morazán. La microcuenca también tiene parte en la zona conocida como los ex Bolsones que actualmente pertenece al municipio de Yarula departamento de la Paz, Honduras.

La quebrada El Calambre, es el tributario más importante del río Olominas, dicha quebrada va desde el límite norte de la microcuenca hasta la zona Noreste del municipio de Perquín donde la quebrada se une al río de Olominas, la figura 1.1 muestra la microcuenca del río Olominas y sus tributarios.

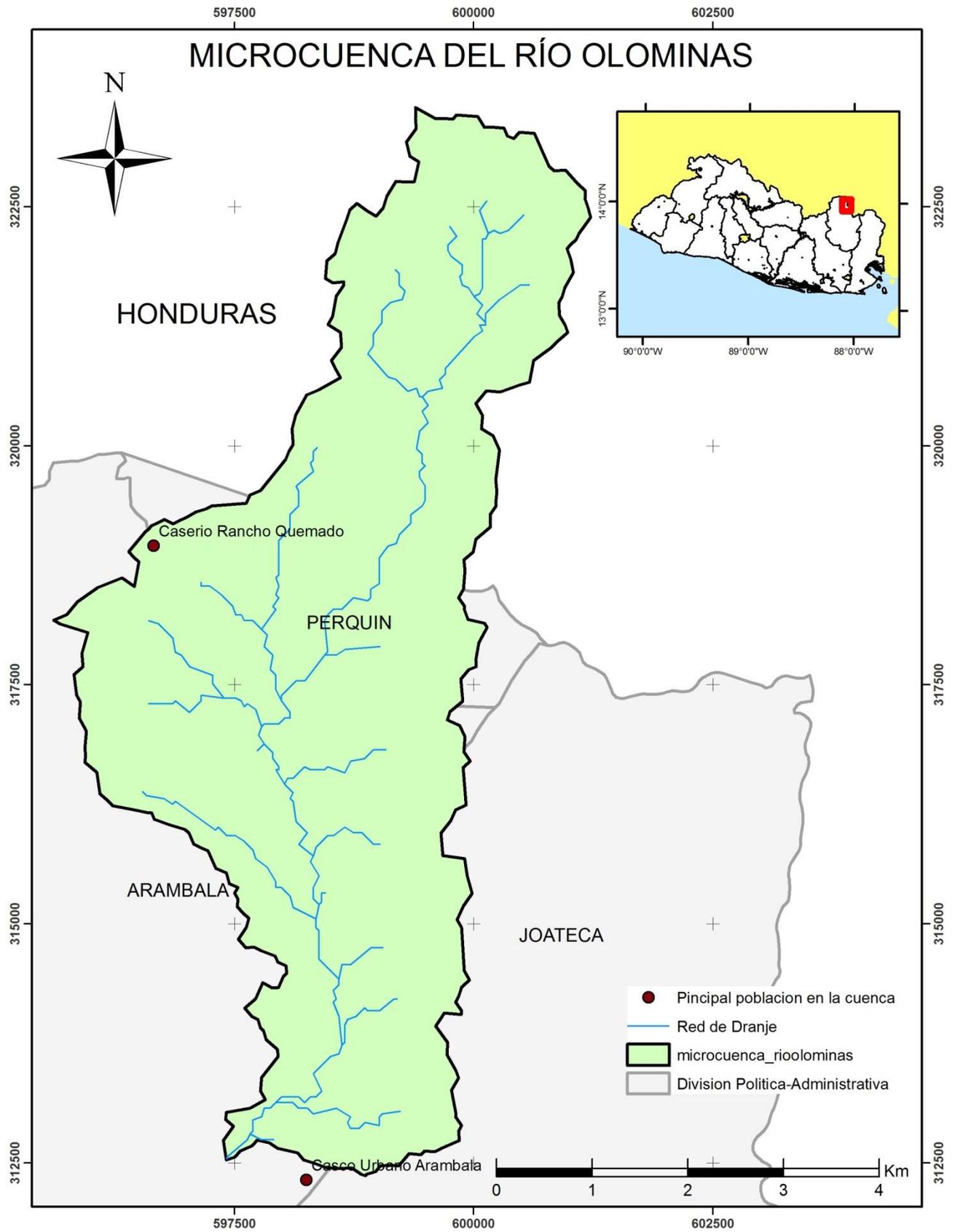


Figura 1. 1 Delimitación de microcuenca del río Olominas y sus tributarios. De gris se muestran os municipios de El Salvador que comparten territorio con la microcuenca y el punto rojo muestra la ubicación de la única población que habita dentro de la microcuenca

En la quebrada el Calambre está ubicado el sistema de captación que abastece del recurso agua al casco urbano del municipio de Perquín y la comunidad de Rancho Quemado en el cual se beneficia a 864 usuarios; 626 en el casco urbano y 238 en Rancho Quemado (Perquin 2016). Este sistema de abastecimiento de agua cuenta con sistema de captación, desarenador, sedimentador, planta tanques de almacenamiento y distribución, redes de tubería para la distribución en el casco urbano y Rancho Quemado.

El casco urbano de Perquín cuenta actualmente con 4 tanques de almacenamiento de agua, dos de estos tanques fueron construidos en el 2018, 3 de los tanques tienen una capacidad de 200 metros cúbicos y el cuarto tiene 70 metros cúbicos de capacidad de almacenamiento, los 4 tanques tienen la capacidad de almacenar un máximo de 670 metros cúbicos de agua, el caserío de Rancho Quemado cuenta con un tanque con capacidad de 200 metros cúbicos para abastecer a la población

En el año 2016 se realizó un estudio para el ordenamiento del recurso hídrico del cual se obtuvieron resultados de oferta y demanda hídrica para uso doméstico en Perquín como lo muestra la Tabla 1.1

Tabla 1. 1: oferta y demanda hídrica, modificada de (Plan de Ordenamiento Del Recurso Hídrico Del Municipio De Perquín 2016)

Organización responsable	Capacidad de almacenamiento m ³	Aforos (L/s)	Producción diaria (L/d)	Demanda diaria (L/d)	Frecuencia de distribución
Alcaldía municipal de Perquín	440	10.38	896,832	315,000	Racionada

Según el plan de ordenamiento del recurso hídrico del municipio de Perquín (2016) El caudal total de la quebrada El Calambre es de 63.03 L/s, del cual 44.48 L/s es desviada; luego se divide en dos secciones; Cerca de 34.1 L/s son utilizados para alimentar un generador eléctrico. El agua se reintegra a la quebrada El Calambre y cerca de 10.38 L/s se utiliza para el abastecimiento en los hogares. Lo cual sugiere que a diario se recolecta el doble de agua de lo que se consume.

Si la producción diaria de agua duplica el consumo diario, no parece necesario racionar el agua para la población, pero según el Plan de Ordenamiento de Recurso Hídrico en el municipio de Perquín, el agua es racionada porque hay deficiencia en la gestión del recurso hídrico que indica a la escases de

agua, lo que debe significar que está ocurriendo algo que está siendo ignorado por los programas de gestión de recurso hídrico en el casco urbano de Perquín.

1.1 Formulación del problema

1.1.1 Pregunta general

¿Es necesaria una propuesta de gestión de microcuenca transfronteriza del río Olominas?

1.1.2 Preguntas específicas

¿Cuál es la importancia de realizar un diagnóstico hidrológico de la microcuenca transfronteriza del río Olominas?

1.2 Antecedentes

En el año 2016 se realizó un diagnóstico socioeconómico que involucró a varias instituciones públicas y privadas del municipio de Perquín, para hacer un diagnóstico acerca del recurso hídrico. La Iniciativa Consultora (IC) identificó a las instituciones con cierta responsabilidad de administrar el agua, las cuales son: Unidad Ambiental Municipal, Casa de la Cultura, Instituto Nacional de Perquín (INPER), Unidad de Salud Perquín, Unidad Municipal de la Mujer y Centro Escolar de El Volcancillo; Dicho diagnóstico tuvo mayor enfoque en el problema de escasez del agua,

En dicha consultoría se concluyó:

La población del municipio de Perquín identifica la escasez y la contaminación del agua como los principales problemas para la comunidad, y asocian como causas la deforestación, la quema de los bosques, el aumento de la población y el crecimiento turístico, entre otros. Por otra parte, plantean como efectos directos de estos problemas la disminución de los caudales en las fuentes hídricas y problemas a nivel de producción agrícola. También identifican el desarrollo de eventos extremos climatológicos a consecuencia del cambio climático (Plan de Ordenamiento Del Recurso Hídrico Del Municipio De Perquín 2016)

1.3 Justificación

El abastecimiento de agua para el consumo humano es una necesidad primaria para las poblaciones en El Salvador. El recurso hídrico se obtiene generalmente por extracción de acuíferos por medio de pozos, captación de manantiales y ríos. Según la Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa 2015 (CEL) la cuenca del Río Lempa, es la cuenca más grande de El Salvador. Según El Ministerio de Ganadería y Agricultura MAG (2012) en el documento de Clasificación de Ríos por Cuencas Hidrográficas, C.A. En Morazán la subcuenca más grande es la del río Torola. Casi en su totalidad las microcuencas del área Norte de Morazán pertenecen a la subcuenca del río Torola como la microcuenca del río Olominas; Ee ubica en los municipios de Perquín, Arambala y Joateca, además esta microcuenca comparte territorio con la zona de los ex Bolsones que pertenece al departamento de la Paz, Honduras. Según el Plan Maestro de Aguas Perquín (2016) el abastecimiento de agua potable del casco urbano de Perquín y uno de sus caseríos más grandes conocido como Rancho Quemado es obtenido de la Quebrada El Calambre, que es uno de los afluentes principales de a microcuenca del río Olominas. En los últimos años ha comenzado a notarse un déficit del recurso hídrico que podría deberse al aumento en actividades agrícolas (Perquín 2016). El buen manejo de los recursos hídricos es fundamental para el desarrollo las comunidades, existe la necesidad de identificar, confrontar y solucionar los problemas relacionados al recurso del agua potable, por lo que resulta necesario enlazar a la población y organizaciones que comparten el mismo sistema de abastecimiento para crear una red de información que permita la recolección de parámetros hidrológicos que facilita la identificación del estado del recurso hídrico.

Según la UNESCO (2015) en las proyecciones sobre acceso al agua en El Salvador presentara escasez de agua en todo el país para el año 2050, El Salvador es vulnerable a sequias y degeneración de cuencas, especialmente el oriente del país, debido a su conexión con el corredor seco de Centroamérica, esto indica que la disponibilidad de agua se ve amenazada, para que las municipalidades puedan tomar cartas en el asunto de manera asertiva y efectiva; Es necesario que tengan conocimiento del estado de la cuenca, Es ahí donde el diagnostico hidrológico retoma importancia para ser ejecutado.

La mayoría de información que se pudo obtener relacionada al área de estudio es toda de escala nacional, es decir que no hay ningún tipo de información local sobre la Geomorfología, biomasa o hidrología, lo cual fue razón suficiente para implementar la investigación.

1.4 Limitaciones

La limitación principal fue la falta de información local y difícil acceso a la información nacional por parte de los organismos nacionales encargados de coleccionar los datos meteorológicos.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Elaborar un diagnóstico hidrológico de la microcuenca transfronteriza del río Olominas por medio de tratamientos de información hidrológica y geomorfológica para proponer un insumo en la gestión hídrica.

1.5.2 Objetivos específicos

- Identificar las características geomorfológicas de la microcuenca transfronteriza del río Olominas, utilizando sistemas de información geográfica.
- Estimar el cambio en la vegetación de microcuenca transfronteriza del río Olominas, con uso de teledetección.
- Determinar el estado hídrico de la microcuenca transfronteriza del río Olominas, realizando un balance hídrico.

CAPITULO II MARCO TEORICO

MARCO TEORICO

2.1 Ciclo Hidrológico

El ciclo hidrológico se considera el concepto fundamental de la hidrología. Como todo ciclo, el hidrológico no tiene ni principio ni fin; y su descripción puede comenzar en cualquier punto. El agua que se encuentra sobre la superficie terrestre o muy cerca de ella se evapora bajo el efecto de la radiación solar y el viento. El vapor de agua, que así se forma, se eleva y se transporta por la atmósfera en forma de nubes hasta que se condensa y cae hacia la tierra en forma de precipitación. Durante su trayecto hacia la superficie de la tierra, el agua precipitada puede volver a evaporarse o ser interceptada por las plantas o las construcciones, luego fluye por la superficie hasta las corrientes o se infiltra. El agua interceptada y una parte de la infiltrada y de la que corre por la superficie se evapora nuevamente. De la precipitación que llega a las corrientes, una parte se infiltra y otra llega hasta los océanos. La Figura 2.1 muestra un esquema del ciclo Hidrológico (Mijares 1989)

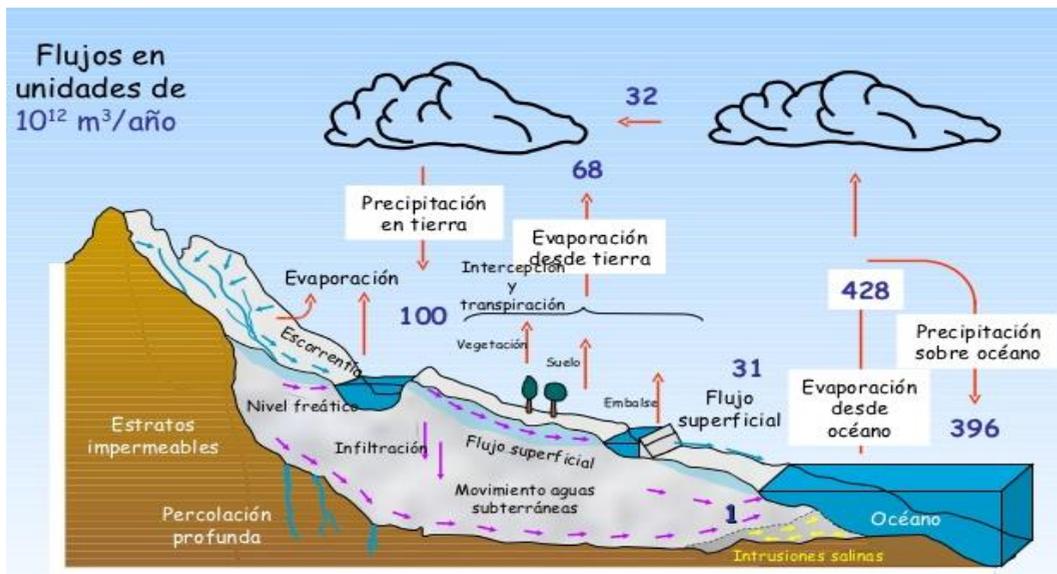


Figura 2. 1 Ciclo Hidrológico, (Santayana 2010)

2.1.1 Acuíferos

Partiendo desde lo más general, un acuífero es una formación geológica que acumula agua y con capacidad para cederla. Permite circulación del agua por fisuras o poros, tiene la capacidad para transmitir y almacenar agua, como conductor de transmisión puede transportar agua de manera subterránea y superficial de las áreas de recarga hacia lagos, pantanos manantiales y pozos. Como depósitos de almacenamiento, los acuíferos suministran agua de sus reservas para ser utilizada cuando la extracción exceda a la recarga y almacenando agua durante períodos de escasez o cuando debido a actividad humana se extrae más agua de la que ingresa al acuífero (Batres 2015).

Por lo general los acuíferos abarcan grandes zonas que pueden considerarse como grandes zonas subterráneas de almacenamiento de agua, de manera muy general los acuíferos se pueden categorizar como acuíferos confinados y no confinados (David Keith Toad 1873).

Un acuífero no confinado es aquel en el cual el nivel freático sirve como superficie superior de la zona de saturación, no hay estratos impermeables sobre el nivel freático el agua en este tipo de acuíferos se encuentra a presión atmosférica, este tipo de acuíferos es conocido también como libre, freático o acuífero no artesiano (David Keith Toad 1873).

Un acuífero confinados también conocidos como acuíferos artesianos tienen la característica de estar en zonas o partes del terreno en el que la presión se mucho mayor que la presión atmosférica y rodeado por estratos impermeables o cuasi impermeables, cuando se hace un pozo que llega hasta un acuífero confinado, se libera presión que hace que el nivel del pozo este por encima nivel más alto en el confinado (David Keith Toad 1873). La figura 2.2 es un esquema de acuífero confinado y no confinado

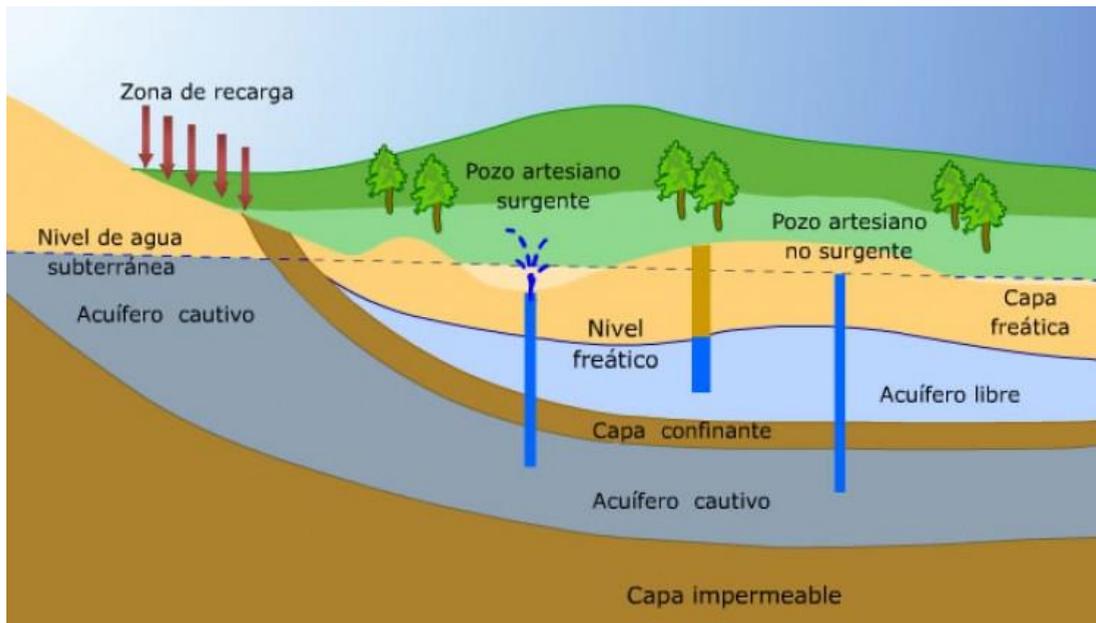


Figura 2. 2 esquema acuífero confinado y no confinado de distribución de aguas (Mascareño 2016).

Un caso especial del acuífero no confinado es el caso del acuífero colgado, él está separado del cuerpo de agua principal, cuando el agua se infiltra se almacena en algún estrato que le permite acumularse, los colgados casi siempre están por encima del nivel freático del acuífero principal (David Keith Tood 1873). La figura 2.3 muestra el esquema de dos acuíferos colgados.

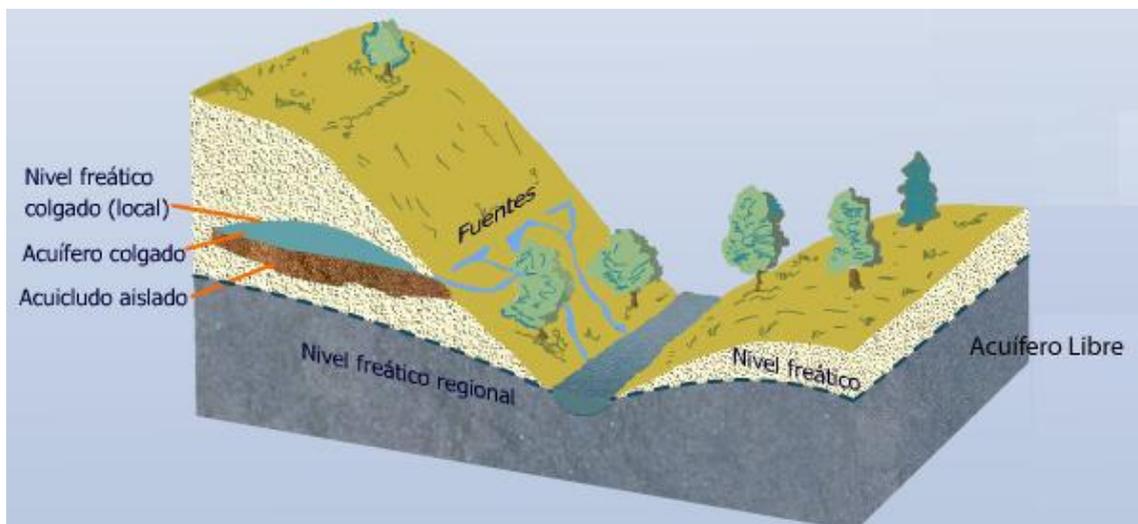


Figura 2. 3 Esquema de dos acuíferos colgados (Universidad Complutense de Madrid s.f.).

2.1.2 Cuenca hidrológica

Las cuencas hidrológicas son unidades morfológicas que integran el concepto de cuenca hidrográfica (parte superficial de un acuífero) y toda la estructura hidrogeológica (parte subterránea del acuífero), la figura 2.4 muestra una cuenca hidrológica como la unificación de la cuenca hidrogeológica e hidrográfica



Figura 2. 4 Esquema de cuenca hidrológica (Watler 2017)

Tanto las cuencas hidrográficas como las hidrológicas se pueden subdividir en tres zonas de funcionamiento hídrico principales: zona de cabecera, zona de captación-transporte y zona de emisión (Watler 2017)

Las zonas de cabecera: de las cuencas permiten la captación inicial de las aguas y el suministro de las mismas a las zonas inferiores durante todo el año. Los procesos en las partes altas de la cuenca invariablemente tienen repercusiones en la parte baja dado el flujo unidireccional del agua, y por lo tanto, toda la cuenca se debe gestionar como una sola unidad. En este contexto, los bosques en las cabeceras de las cuencas cubren una importante función reguladora ya que controlan la cantidad y temporalidad del flujo del agua, favorecen la infiltración y recarga de los mantos freáticos y protegen a los suelos de ser erosionados por el agua con la consecuente sedimentación y degradación de los ríos, y la pérdida de fertilidad en las laderas (Watler 2017).

Zonas de captación-Transporte: es la porción de la cuenca que en principio se encarga de captar la mayor parte de agua que entra en el sistema, además debe transportar el agua que proviene de la zona de cabecera (Galvez 2011)

En las zonas de emisión de los acuíferos, las lagunas costeras regulan el funcionamiento de los ecosistemas marinos adyacentes. Los manglares están considerados entre los ecosistemas más productivos y la actividad socioeconómica asociada a los mismos abarca actividades forestales, pesqueras, turístico- recreativas, entre otras (Watler 2017).

2.1.3 Cuenca hidrográfica

Se define cuenca hidrográfica como una la unidad natural, cuyos límites físicos son definidos por la divisoria superficial de las aguas, conocida como parte aguas, que ante la ocurrencia de precipitaciones y la existencia de flujos o caudales base, permite configurar una red de drenaje superficial que canaliza las aguas hacia otro río, al mar o a otros cuerpos de agua, como los lagos, embalses artificiales y naturales, humedales, desde la parte más alta de la cuenca hasta su punto de emisión en la zona de menor altitud (Watler 2017) la figura 2.5 muestra un modelo de cuenca Hidrográfica

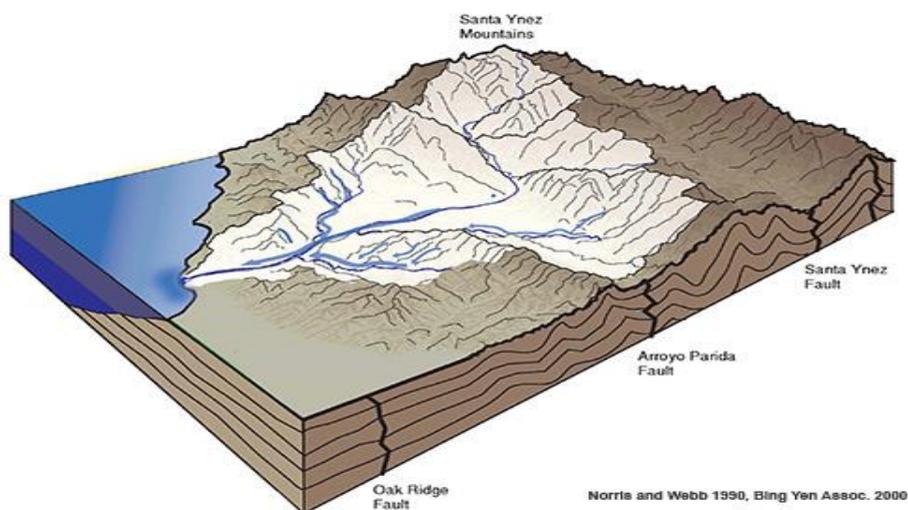


Figura 2. 5 Modelo 3D de una cuenca Hidrográfica (Po Chi Fung 2018)

2.1.4 Cuencas Transfronterizas

El carácter internacional de la cooperación para la gestión y gobernanza del agua se deriva del hecho siguiente: 263 cursos de agua atraviesan varios estados o sirven de límite fronterizo. Se encuentran 69

en Europa, 59 en África, 57 en Asia, 38 en América del Sur y 40 en América del Norte, entre los cuales se incluyen 17 ríos de América Central. Las cuencas de estos cursos de agua internacionales ocupan más del 50% de la superficie de la Tierra (Morán 2014)

Conforme el literal a) del artículo 38 del Estatuto de la Corte Internacional de Justicia (CIJ) para estimar un caso la Corte debe considerar los convenios internacionales que en materia de aguas internacionales están representados por tres instrumentos, dos con fuerza de ley, y un tercero en proceso de aprobación de parte de la Asamblea General de Naciones Unidas para convertirse en convención internacional (Morán 2014). Estos son los siguientes

Convención sobre el Derecho de los Usos de los Cursos de Agua Internacionales para Fines Distintos de la Navegación, aprobada por la Asamblea General de Naciones Unidas en 1997. Entró en vigor en agosto 2014 (Morán 2014)

Convenio sobre la Protección y Utilización de los Cursos de Agua Transfronterizos y de los Lagos Internacionales (1992) vigente en los estados miembro de la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (CEPE). A partir del 2013, por decisión de la Reunión de las Partes, fue abierto a firma de cualquier estado parte de Naciones Unidas (Morán 2014).

Resolución adoptada por la Asamblea de las Naciones Unidas durante el 68º periodo de sesiones (2011) sobre el Derecho de los Acuíferos Transfronterizos, texto aún no redactado como Convenio y por tanto, no aprobado por la Asamblea General de las Naciones Unidas (Morán 2014).

2.1.5 Clasificación de cuencas hidrográficas

Según su capacidad de drenaje y la manera en la que conducen el agua, las cuencas hidrográficas pueden ser, Arreicas, Exorreicas, Criptorreicas y Endorreicas (J. Faustino, F. Jiménez 2000).

Se llaman Arreicas cuando no logran producir vertientes de agua por escurrimiento, sus aguas se pierden por infiltración y evaporación, (J. Faustino, F. Jiménez 2000) las zonas donde hay cuencas arreicas son muy áridas y los flujos de agua son temporales (Alvarado 2015)

Las cuencas Endorreicas son las que drenan en algún lago o embalse sin llegar al mar (J. Faustino, F. Jiménez 2000). Son Criptoreicas aquellas cuyos escurrimientos no corresponden a un drenaje superficial aparente sino que carecen de una red fluvial permanente y organizada (Alvarado 2015). Las cuencas Endorreicas drenan a un embalse o lago sin poder llegar al mar. Las cuencas Exorreicas cuando las vertientes se unen a vertiente más grandes creando una red de ríos que llega al mar (J. Faustino, F. Jiménez 2000).

El balance hídrico de las cuencas se puede clasificar como: balanceadas (cuando la oferta y la demanda son equilibradas) con déficit (cuando la demanda es mayor que la oferta) y exceso (cuando la oferta sobrepasa la demanda) (J. Faustino, F. Jiménez 2000).

La clasificación de cuencas no es estandarizada y tampoco única, hay muchas formas de catalogar las cuencas como el tamaño, el número de orden de drenaje. (J. Faustino, F. Jiménez 2000), la Tabla 2.1 muestra la clasificación de Cuenca, Subcuenca y Microcuenca

Tabla 2. 1: Clasificación de Cuenca, Subcuenca y Microcuenca, modificado de (J. Faustino, F. Jiménez 2000)

UNIDAD	Nº DE ORDEN	AREA (km ²)
Microcuenca	1, 2 y 3	10 – 500
Subcuenca	4 y 5	500 - 2000
Cuenca	6, 7 o mas	Más de 2000

Subcuencas se refiere una área dentro del territorio de una cuenca que desarrolla canales de drenajes que van al drenaje principal de la cuenca, varias subcuencas pueden formar una cuenca; las microcuencas son áreas que forman un canales de drenaje al curso principal de la subcuenca, y como es de esperar, varias microcuencas pueden estar en la misma subcuenca (J. Faustino, F. Jiménez 2000).

2.2 Balance Hidrológico

El balance hídrico se basa en la ley de conservación de masas y representa una de las herramientas de mayor uso en la práctica hidrológica; expresa la equivalencia entre los aportes de agua que entran por

un lado en una unidad hidrográfica determinada y la cantidad de agua que se evacua por el otro, considerando además las variaciones internas en el almacenamiento de humedad ocurridas durante un período de tiempo determinado (encolombia s.f).

Los balances hídricos, permiten determinar la disponibilidad hídrica natural de las áreas en consideración y conocer el comportamiento de la oferta de agua, bien sea superficial o subterránea, a través del estudio de las diferentes fases del ciclo hidrológico (encolombia s.f).

El Balance Hidrológico relaciona las variables que intervienen en el ciclo hidrológico: Precipitación, evapotranspiración, escurrimiento superficial, almacenamiento superficial y Subterráneo y flujo de agua subterránea. Se aplica cuando se realiza una distribución de los recursos hidráulicos en cuencas particulares. Es imprescindible en los estudios de regulación en los proyectos de suministro de agua para acueducto, riego y generación hidroeléctrica (Sergio Fatorreli, Pedro C. Fernández 2011). La ecuación general del Balance Hídrico puede escribirse según (Villarán 2017) como se muestra en la ecuación 1

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad \text{Ecuación 1}$$

Dónde: SW_t es la cantidad de agua en el suelo en (mm), SW_0 es el contenido inicial de agua en el suelo (mm), t es el tiempo (día, mes, año), R_{day} es la precipitación diaria (mm), Q_{surf} es la escorrentía superficial (mm), E_a es la evapotranspiración (mm), W_{seep} es la cantidad de agua acumulada en la zona no saturada del suelo (mm) y Q_{gw} es la cantidad de agua subterránea que retorna hacia los ríos como flujo base o caudal de base (mm) (Villarán 2017).

2.2.1 Variables del Balance Hídrico

Para la aplicación de la ecuación del balance hídrico es necesario conocer las variables involucradas, según el manual de SWAT (2010) las variables hidrológicas a tomar en cuenta para el balance hídrico aparecen en la Tabla 2.2. Debido a que la cantidad de variables que se pueden incluir en un modelo hidrológico como los parámetros relacionados a nieve o fenómenos costeros, se tomaran en cuenta solo los parámetros observables en el área de estudio

Tabla 2. 2: Variables de balance hídrico (Uribe 2010)

Variables de entrada	Variables generadas
Precipitación	Almacenamiento de dosel (intercepción)
Temperatura	Infiltración
Humedad relativa	Redistribución
Radiación solar	Evapotranspiración
Velocidad del viento	Escorrentía
Bandas de elevación	Flujo subterráneo lateral
	Flujo de retorno (caudal de salida)

El modelado hídrico es a menudo el primer paso en el desarrollo de sistemas de decisión espacial para la identificación de áreas afectadas o vulnerables debido a efectos naturales o la acción humana, especialmente la acción agrícola, la cuestión importante es verificar si el modelaje aplicado arroja datos significativos sobre la zona de estudio, para esto se aplican metodologías que compara los datos simulados en este caso por SWAT con los datos medidos en campo (Kraemer 2011), Kraemer (2011) sugiera que los datos simulados en SWAT están muy cerca de los valores medidos en estaciones medidas directamente.

2.2.2 Unidades medidas en estaciones meteorológicas

Tanto SWAT como otros programas de modelación cuentan con la base de datos que se obtuvo gracias al esfuerzo mundial de normalizar la información meteorológica, SWAT genera estaciones de modelaje distribuidas en todo el mundo, cada estación contiene información de precipitación que es la cantidad de agua que se aporta a las cuencas en forma de lluvia, el algoritmo de SWAT se encarga rellenar los espacios de vacío en las series de datos utilizando datos medios; Temperatura y la radiación solar son generadas utilizando una distribución normal, una ecuación de la continuidad es integrada para justificar las variaciones de temperatura y radiación causadas por las condiciones lluviosas y secas; Humedad relativa esta variable que es en términos simples la cantidad de vapor de

agua que encuentra en la atmosfera es generada en SWAT utilizando una distribución triangular para simular la humedad relativa, media y diaria del promedio mensual, este variable también utiliza una ecuación integrada para justificar los efectos de los días lluviosos y secos; Velocidad del viento que es la velocidad a la que se mueven las corrientes de viento, es generada utilizando una ecuación exponencial modificada para generar una media de viento diario y mensual (Uribe 2010).

2.2.3 Variables Generadas por SWAT

Intercepción

Intercepción es aquella parte de la precipitación que es almacenada temporalmente sobre la superficie de las hojas y ramas, mientras que pérdida por intercepción corresponde a la evaporación del agua almacenada en las copas. La precipitación neta (Pn), que es aquella parte de la precipitación incidente a una masa boscosa que llega finalmente al suelo forestal, se determina mediante la relación presentada en la ecuación 2 (Huber 1984).

$$P_n = P_d + P_f \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde Pd es la precipitación directa que cae en el suelo de la zona boscosa y Pf el escurrimiento fustal.

Las pérdidas por intercepción (I), que es la cantidad de la lluvia interceptada por las copas y troncos de los árboles y luego evaporada, se determinan a partir de la relación presentada en la ecuación 3 (Huber 1984).

$$I = P - (P_n) \quad \text{Ecuación 3}$$

Siendo P la precipitación en campo abierto.

Evapotranspiración

La evapotranspiración en una zona de cultivo se define como la transpiración de la planta, cuando el suelo se encuentra a capacidad de campo, más la evaporación del suelo. En este estudio, asumiremos que la evapotranspiración potencial real va a ser proporcional a la humedad del suelo, comparada con

la diferencia de humedad entre la capacidad de campo y el punto de marchitez. Esto es, por ejemplo si una planta a capacidad de campo evapotranspirará 3 mm por día, siendo la capacidad de campo del suelo 12%, el punto de marchitez permanente de 2% y el suelo se encuentra a una humedad de 6%, la evapotranspiración potencial real (ETPR) se obtendrá con la ecuación 4 (G. Schosinsky 2006).

$$ETPR = (HS - PM)(ET)/(CC-PM) \quad \text{Ecuación 4}$$

Dónde: ETPR [mm/día] = Evapotranspiración potencial real, HS [%] = Humedad del suelo, ET [mm/día] = Evapotranspiración de la planta a capacidad de campo, CC [%] = Capacidad de campo, PM [%] = Punto de marchitez permanente (G. Schosinsky 2006).

Como resultado se obtiene un ETPR= 1.2 mm/d.

En una cuenca o en una zona arbitraria de la cuenca, es casi imposible determinar la evapotranspiración de la vegetación, debido a la gran variedad de vegetación y grado de desarrollo de las plantas existentes en una cuenca o en una zona de la misma. Por este motivo, es conveniente asumir una evapotranspiración, que se estime como promedio de la cuenca. Esta evapotranspiración promedio de la cuenca, la asumiremos que es igual la evapotranspiración potencial (ETP). Para el cálculo de la evapotranspiración potencial, existen una serie de ecuaciones, algunas de ellas requieren una serie de datos, que pocas estaciones meteorológicas los tienen. Por este motivo, se utilizará la ecuación Blaney & Criddle (G. Schosinsky 2006), definida como la ecuación 5

$$ETP \text{ (mm/mes)} = (8.10 + 0.46T) P_s \quad \text{Ecuación 5}$$

Dónde: ETP = Evapotranspiración potencial en [mm/mes], T = Temperatura media mensual en [grados centígrados] (dato meteorológico), P_s = Porcentaje de horas de luz solar mensual con respecto al año [%]. Existen tablas que tienen los porcentajes de luz solar para las diferentes latitudes, tanto del hemisferio norte como del sur (G. Schosinsky 2006).

Infiltración

De la lluvia que llega a la superficie del suelo, una fracción de ella infiltra, otra escurre y una pequeña fracción queda en charcos, que termina evaporándose o infiltrando. Sin embargo, la única fracción de lluvia con potencial a infiltrarse es la que llega a la superficie del suelo. Otra fracción de lluvia a considerar; es la interceptada por el follaje de las plantas (G. Schosinsky 2006).

Uno de los factores que más influyen en la infiltración de la lluvia en el suelo, es el coeficiente de infiltración debido a la textura del suelo (Kfc) (G. Schosinsky 2006), que está dado por la ecuación 6

$$K_{fc} = 0,267 \ln (f_c) - 0,000154f_c - 0,723 \quad \text{Ecuación 6}$$

K_{fc} [adimensional] = Coeficiente de infiltración (fracción que infiltra por textura del suelo); f_c [mm/día] = Infiltración básica del suelo. Para aplicar esta ecuación, el rango de f_c ha de encontrarse entre 16 a 1568 mm/día. Para valores de f_c menores a 16 mm/día, $K_{fc} = 0,0148f_c/16$. Para valores de f_c mayor a 1568 mm/día, $K_{fc} = 1$. Entonces el valor de K_{fc} dependerá del valor de infiltración, Si f_c se encuentra entre 16 y 1568 mm/día $K_{fc} = 0,267 \ln (f_c) - 0,000154f_c - 0,723$. Si f_c es menor a 16 mm/día $K_{fc} = 0,0148f_c/16$. Si f_c es mayor de 1568 mm/día $K_{fc} = 1$ (G. Schosinsky 2006).

El valor de f_c corresponde a la permeabilidad del suelo saturado, en los primeros 30 centímetros de profundidad, por considerar que este es el espesor que está en contacto directo con el agua de lluvia. Dicho valor se obtiene en el campo, con el método doble de anillos aplicada en la superficie del terreno. El valor de K_{fc} , es derivado para los valores de lluvia mensual. Por lo tanto, la fracción que infiltra debido a la textura del suelo, permite obtener la infiltración mensual debido a este concepto. Además del coeficiente de infiltración debido a la textura del suelo, influye la pendiente del terreno y la vegetación. El coeficiente de infiltración (C_i) es el factor por el cual hay que multiplicar la precipitación mensual para obtener el agua que se infiltra mensualmente hacia el suelo. En una zona dada, entre menor sea la pendiente del terreno y mayor sea su cobertura vegetal, la velocidad de escurrimiento se retrasa, generando una mayor infiltración (G. Schosinsky 2006). Los valores sugeridos de estos componentes, que conforman el coeficiente de infiltración aparecen en la tabla 2.3

Tabla 2. 3: Componentes del coeficiente de infiltración

Componentes del coeficiente de infiltración			
Pendiente (%)	Kp	Cobertura Vegetal	Kv
0,02%-0,06%	0.30	Zacate menos del 50%	0.9
0,3%-0,4%	0.20	Terrenos cultivados	0.10
1%-2%	0.15	Cobertura con pastizal	0.18
2%-7%	0.10	Bosques	0.20
mayor de 7%	0.06	Zacate más del 75%	0.21

Para la medición de las características de infiltración pueden encontrarse de manera directa o indirecta, entre las mediciones directas está el método de doble anillo, El método consiste en saturar una porción de suelo limitada dos anillos concéntricos para a continuación medir la variación en el tiempo del nivel del agua en el cilindro interior (G. Schosinsky 2006).

Escurrimiento

La escorrentía superficial generada por la lluvia mensual, corresponde a la precipitación mensual menos la retención de lluvia en el follaje menos la infiltración (G. Schosinsky 2006). La escorrentía mensual se calcula con la ecuación 7

$$ESC = P - Ret - Pi \quad \text{Ecuación 7}$$

ESC = Escorrentía superficial en mm/mes. P = Precipitación en mm/mes (dato meteorológico). Ret = Retención de lluvia mensual por follaje en mm/mes. Pi = Precipitación que infiltra mensualmente al suelo en mm/mes se obtiene de la ecuación 8 y 9

$$Pi = (Ci)(P-Ret) \quad \text{Ecuación 8}$$

$$Ret = P (Cfo) \quad \text{Ecuación 9}$$

Dónde: Pi = Precipitación que infiltra mensualmente al suelo en [mm/mes]. Ret = Retención de lluvia mensual por follaje en mm/mes. Ci = Coeficiente de infiltración [adimensional] como muestra la ecuación 10

$$Ci = Kp + Kv + Kfc \quad \text{Ecuación 10}$$

Redistribución

La redistribución se refiere al movimiento continuo del agua por un perfil del suelo después de haberse infiltrado, esta redistribución es causada por las diferencias en el contenido de agua dentro del perfil, este efecto generado por el gradiente de humedad dentro del perfil del suelo se detiene cuando la distribución del agua es uniforme en todo el perfil, SWAT analiza esta variable utilizando la información sobre el suelo, topografía y vegetación (Uribe 2010).

Flujo subterráneo lateral

El flujo subterráneo lateral es una contribución de la corriente de flujo que se origina debajo de la superficie pero por encima de la zona donde las rocas están saturadas con agua, por lo general el flujo subterráneo ocurre entre 0-2 metros bajo la superficie, este parámetro se parece a la redistribución (Uribe 2010).

Caudal de salida

El caudal de salida o flujo de retorno no es más que la cantidad de agua que circula por el río principal en el punto de cierre de la cuenca. Se utilizan diferentes métodos de medición, volumétrico, en el que se intenta medir el volumen de agua que fluye por unidad de tiempo. El método de flotador que mide la velocidad del agua en un determinado perfil del río. El método de molinete que utiliza el mismo principio de flotador, pero utilizando el molinete como un instrumento de medición de velocidad, todos estos métodos utilizan el principio de Bernoulli sobre el caudal como base para determinar la cantidad de agua que retorna de una cuenca. Siguiendo la misma lógica, SWAT se encarga de calcular la cantidad de agua con capacidad de ser aportada al caudal de salida y la cuantifica, después de ser distribuida a lo largo de la cuenca, contabilizando las pérdidas por interceptación, infiltración, absorción de las raíces de las plantas, la evapotranspiración potencial (Uribe 2010). Para esta investigación se aplicó el protocolo utilizado por SWAT. Con la información introducida en su base de datos, SWAT divide al agua subterránea en dos partes, la parte superficial que retorna y contribuye al flujo de retorno o caudal y la parte profunda que contribuye al flujo de regreso a las corrientes fuera de la cuenca. Además el agua infiltrada más allá de las raíces de los árboles se secciona en dos partes, una fracción aporta al caudal de salida y otra es retenida por la vegetación.

2.3 Geomorfología

El término de Geomorfología fue acuñado por el Geólogo William Morris Davis en el siglo XX que etimológicamente significa “Conocimiento racional de las formas de la Tierra”, puede definirse como

Geomorfología al reconocimiento, clasificación y explicación de las diferentes configuraciones que presente la superficie terrestre (Jiménez 1995).

Según Horton 1945 las cuencas hidrográficas a pesar del renacimiento general de la ciencia del siglo XIX, la fisiografía de una cuenca se relaciona en particular con el desarrollo de las formas de la tierra, por los procesos de erosión y gradación sigue siendo bastante cualitativa. Las cuencas fluviales y sus redes de drenaje se describen como "satisfactorias", "maduras", "viejas", "mal drenadas" o "bien drenadas", sin información específica sobre cómo, cuánto o por qué. Esto es, probablemente, el resultado en gran medida de la falta de herramientas adecuadas y funcionamiento

Uno de los propósitos de la geomorfología aplicada a cuencas es darle forma cuantitativa al estudio de las cuencas y abordar problemas como la forma de la cuenca, particularmente el drenaje de cuenca y las redes de drenaje (R. Horton 1945).

Los factores descriptivos de una cuenca de drenaje en relación con su hidrología pueden clasificarse ampliamente como:

(1) factores morfológicos, estos factores dependen solo de la forma de la superficie de la cuenca y la extensión del sistema de drenaje dentro de ella,

(2) factores de suelo, este grupo incluye factores descriptivos de los materiales que forman la base de la cuenca de drenaje, incluidas las propiedades físicas que intervienen en las relaciones de humedad de los suelos,

(3) Factores de vegetación: estos son factores que dependen total o parcialmente de la vegetación, natural o cultivada, que crece dentro de la cuenca de drenaje.

(4) factores climático-hidrológicos, incluye los factores de precipitación, temperatura, evapotranspiración y todos elementos del ciclo hidrológico

La composición de los sistemas de drenaje de una cuenca se pueden expresar cuantitativamente en términos del orden de corrientes, densidad de drenaje, relación de bifurcación y relación corriente-área (R. Horton 1945).

2.3.1 Parámetros geomorfológicos

Orden de corriente

Este índice clasifica los ríos según conexión con otros ríos, se le clasifica río de orden 1 o tributario, a una fuente de agua que solo aporta agua a otro río, cuando dos ríos de orden 1 se juntan, se genera un río de orden 2, cuando dos ríos de orden 2 se juntan, se forma un río de orden 3, si se juntan dos ríos de orden diferente, se conserva el valor del río de orden mayor (Strahler 1957)

Horton en 1945 propuso dos reglas para definir el flujo principal de una cuenca el cual consistía en un análisis de las bifurcaciones, la primera regla es: Partiendo desde el punto de salida de la cuenca se debe seguir el flujo hasta encontrar una bifurcación, se considera como flujo inferior al que tenga mayor grado de bifurcación con respecto a la dirección del flujo que se sigue, la segunda regla trata de corregir el caso en el que ambas ramas de la bifurcación tienen aproximadamente el mismo ángulo de desviación, en esta situación, se toma como flujo inferior a la bifurcación más corta.

Densidad de drenaje

La densidad de drenaje define la longitud de corrientes por unidad de área como muestra la ecuación 12.

$$Dd = \frac{\sum Lr}{A} \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde Dd es la densidad de drenaje; $\sum Lr$ la longitud de ríos en la cuenca y A el área de la cuenca.

La densidad de drenaje es un indicador de la permeabilidad de la superficie de una cuenca, su valor varía de 1.5 a 2.0 para áreas empinadas e impermeables en regiones de altas precipitaciones, tiende a cero para cuencas suficientemente permeables de modo que toda la lluvia ordinariamente se lleva al suelo a través de la infiltración (R. Horton 1945).

Tiempo de concentración

Tiempo de concentración: Este parámetro se utiliza para estimar el tiempo que tarda una gota de agua en recorrer desde la parte más lejana con respecto al punto de cierre, hasta llegar ha dicho punto

(Servicio de Carreteras California). Hay varias ecuaciones para calcular el tiempo de concentración, pero se utilizara ecuación 13 debido a la información que necesita.

$$tc = \frac{0.87LCP^3}{(Z_{max}-Z_{min})^{0.385}} \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde tc es el tiempo de concentración, LCP es la longitud del cauce principal y valores de z son las cotas máximas y mínimas de la cuenca (R. Horton 1945).

Factor de Forma

La configuración geométrica de una cuenca afecta al comportamiento hídrico de la misma, la forma incide en el tiempo de concentración, es decir que afecta al tiempo de recorrido del agua a través de la red de drenaje, por consiguiente el hidrógrama de la cuenca se ve afectado (R. Horton 1932).

El factor de forma se puede escribir como muestra la ecuación 14

$$K_f = \frac{A}{L^2} \quad \text{Ecuación 14}$$

Los valores de K_f indican la forma de la cuenca con afecta al comportamiento hídrico de la cuenca, la tabla 2.4 indica cómo se relacionan los valores de K_f con la forma de la cuenca

Tabla 3.4: Clasificación de parámetro de forma (R. E. Horton 1945)

Valores aproximados	Forma de la cuenca
< 0.22	Muy alargada
0.22-0.30	Alargada
0.30-0.37	Ligeramente alargada
0.37-0.45	Ni alargada, ni ensanchada
0.45- 0.60	Ligeramente ensanchada
0.60-0.80	Ensanchada
0.80-1.20	Muy ensanchada
>1.20	Rodeando el desagüe

El factor de forma intenta medir cuan cuadrada (alargada) puede ser la cuenca. Una cuenca con un factor de forma bajo, esta menos sujeta a crecientes que una de la misma área y mayor factor de forma. Principalmente, los factores geológicos son los encargados de moldear la fisiografía de una región y la forma que tienen las cuencas hidrográficas. Un valor de Kf superior a la unidad proporciona el grado de achatamiento de ella o de un río principal corto y por consecuencia con tendencia a concentrar el escurrimiento de una lluvia intensa formando fácilmente grandes crecidas (R. E. Horton 1945). La figura 2.6 muestra los efectos que tiene la forma de la cuenca sobre el hidrograma.

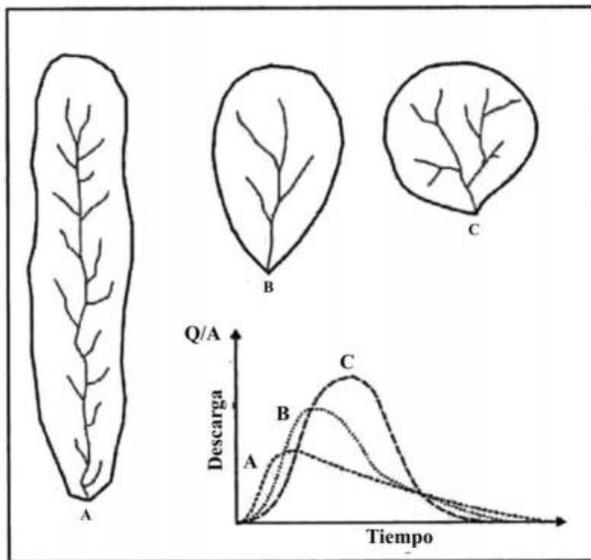


Figura 2.6: Hidrógrama de una cuenca relacionado con la forma de la misma (Worschitz s.f)

Coefficiente de compacidad de Gravelius.

Es la relación que existe entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de la cuenca y el perímetro de una circunferencia, de área igual a la cuenca, también conocido como índice de Gravelius (R. Horton, Drainage-Basin Characteristics 1932).

$$K = \frac{(0.28)P}{(\sqrt{A})} \quad \text{Ecuación 15}$$

La ecuación 15 muestra la relación del índice de gravelius, donde K es el coeficiente de compacidad; P el perímetro de la cuenca (Km); A el área de la cuenca. Cuanto más irregular sea la

forma de la cuenca mayor será su coeficiente de compacidad. Para una cuenca de forma circular el coeficiente de compacidad es $K=1$ y entre más lejos este de uno, su forma será más alargada

El coeficiente de Gravelius indica la capacidad que tiene la cuenca de concentrar agua, entre más circular es la cuenca, mayor es la cantidad de agua que concentra, lo que indica la capacidad para generar inundaciones. La tabla 2.5 muestra la representación de los coeficientes de Gravelius

Tabla 2.5: Rangos de clasificación del coeficiente de Gravelius (Aguilar 2011).

Clase	Rango	Forma según similaridad con circunferencia
1	1.-1.25	Redonda a oval redonda
2	1.25-1.5	Oval redonda a oval oblonga
3	1.5-1.75	Oval oblonga a rectangular oblonga
4	>1.75	Rectangular oblonga

Factor de Alargamiento

Relaciona la longitud máxima encontrada en la cuenca, medida, medida en el sentido de su cauce principal entre el ancho máximo de la cuenca medida perpendicularmente (Aguilar 2011).

$$F = \frac{L}{B} \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde F es el índice de alargamiento; L la longitud máxima de la cuenca (m) y B e ancho máximo de la cuenca (m). La tabla 2.6 muestra los rangos de alargamiento de una cuenca

Tabla 2.6: Niveles de alargamiento de una cuenca (Aguilar 2011).

Rango	Clase de alargamiento
<1.4	Poco alargada
1.4-2.8	Moderadamente alargada
2.8-4.2	alargada
>4.2	Muy alargada

Coefficiente de masividad

Representa la relación entre la elevación media de la cuenca y la superficie. Bajos valores de coeficiente de masividad corresponden a cuencas montañosas y valores altos a cuencas de zonas llanas (Aguilar 2011), dicho índice se obtiene como muestra la ecuación 17.

$$tg = \frac{H_m}{A} \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde tg es el índice de masividad, Hm la altura media de la cuenca (m) y A el área de la cuenca (Km²) según (Aguilar 2011). La tabla 2.7 muestra los valores de masividad aplicados a una cuenca hidrográfica.

Tabla 2.7: Coeficiente de masividad aplicados a una cuenca hidrográfica modificada de (Aguilar 2011).

Rangos de tg	Clases de masividad
0-35	Muy montañosa
35-70	Montañosa
70-105	Moderadamente montañosa

Relación de elongación (Kc)

Es la relación entre el diámetro (D) de un círculo que tenga la misma superficie de la cuenca y la longitud máxima (L) de la cuenca. Para estimar su magnitud se aplica la expresión (Villa 2006):

$$Kc = 1.28 \frac{\sqrt{A}}{L} \quad \text{Ecuación 18}$$

Donde Kc es la relación de elongación, adimensional A es el área de la cuenca y L es la longitud máxima A partir de estudios realizados por (Summerfield, 1991) en un gran número de cuencas, si $Kc \approx 1.0$, la cuenca es plana $0.6 \leq Kc \leq 0.8$, la cuenca es de relieve pronunciado (Villa 2006).

Pendiente media

Se obtiene utilizando in GIS más específicamente al DEM de la cuenca se la aplica la herramienta Surface analysis en la sección de Slope, el cual emite un mapa de todas las pendientes en

la cuenca, con la herramienta de reclass permite crear rangos de pendientes y luego promediar. Según (Aguilar 2011) se puede clasificar la pendiente media de una cuenca como aparece en la tabla 2.8

Tabla 2.8: Porcentaje de pendiente de una cuenca hidrográfica, modificado de (Aguilar 2011).

Pendiente de porcentaje	Tipo de Terreno
2-5	Llano
5-10	Suave
10-15	Accidentado medio
15-25	Accidentado
25-50	Fuertemente accidentado
Mayor 50	Escarpado

2.4 Diagnóstico hidrológico de una microcuenca

Se realiza un diagnóstico cuantitativo y cualitativo a una microcuenca con el fin de conocer sus características, sus puntos vulnerables y puntos fuertes. La importancia de hacer el diagnóstico hidrológico a una microcuenca es para optimizar y cuidar el recurso hídrico. Se sigue una serie de pasos (Watler 2017) :

Primero; Por medio de la caracterización hidrológica se identifica los problemas cuantitativos y cualitativos también se calcula la potencialidad del acuífero, los riesgos y vulnerabilidades.

Segundo; se analizan los problemas, potencialidades, vulnerabilidades y riesgos en función de sus causas, efectos, zonas de ubicación de los problemas, actores afectados y alternativas de solución.

Tercero; priorizar los problemas biofísicos relacionados con el manejo de los recursos naturales, así como potencialidades, vulnerabilidades y riesgos. Cuarto; Se analiza las causas y consecuencias que se priorizan (Watler 2017).

2.5 Herramientas para la modelación hidrológica.

SoilGrids

Durante esta investigación se utilizaron diferentes softwares para poder generar un modelo hidrológico, en este apartado se mencionan los más destacados para esta investigación que tiene el fin de describir las características de la microcuenca del río Olominas.

SoilGrids está diseñado como un sistema globalmente coherente y basado en datos que predice las propiedades y clases del suelo utilizando covariantes globales y modelos ajustados globalmente. El modelo está basado en el artículo publicado por Helgl T. (2017), luego fue impulsado por ISRIC World Soil Information en 2018. Dicha herramienta tiene una amplia variedad de parámetros a nivel global, entre estos están los tipos de suelo, la cantidad de carbono orgánico e inorgánico retenido por el suelo, las características físicas y químicas de los suelos, y las características propias de los suelos, este modelo fue diseñado con el fin de proporcionar información relacionada a suelos para fines de investigación, los protocolos de medición utilizados en este modelo están explicados en el artículo (Global soil information base data automated mapping) por Helgl T.

La plataforma soilgrid tiene la ventaja de que sus capas pueden descargarse con formatos kmz y Raster. El modelo presenta diferentes escalas; Con píxeles desde 250m² hasta 1 km² dependiendo de la capa que se utiliza, en el caso de los tipos de suelo, el área del píxel es de 250m², la cual fue de ayuda para esta investigación.

SWAT

El modelo Soil and Water Assessment tool (SWAT), está enfocado a cuenca hidrográficas. El modelo lo desarrolló Dr Jeff Arnold para la USDA, el cual fue diseñado para predecir el impacto de las prácticas de manejo de suelo en la generación y conservación de agua, el modelo tiene una orientación agrícola ya que es donde se encuentran las mayores perturbaciones del suelo de parte de los humanos.

SWAT está diseñado como un modelo a largo plazo es decir que no solo simula un solo acontecimiento de flujo detallado, más bien es una herramienta que requiere información específica sobre el clima, el tiempo, propiedades del suelo, topografía y uso de suelo para generar modelos con líneas de tiempo continuas (Uribe 2010).

SWAT es solo un modelo, una serie de ecuaciones que se completan con la información adecuada, pero la ejecución de este modelo requiere de otros programas, en la actualidad el modelo de SWAT es ejecutable en el sistema de información geográfica, QGIS el cual es llamado QSWAR y ARCGIS se encuentra como ACRSWAT, donde QGIS es un sistema de código abierto el cual no requiere de ninguna licencia para ser aplicado. Aunque el uso de este programa es más engorroso que la plataforma ARCGIS que pertenece a ESRI que tiene más facilidades de uso, QGIS ha presentado grandes avances con respecto a la amabilidad con el usuario.

La plataforma en línea de SWAT cuenta con información meteorológica fácilmente aplicable a sus modelos, en lugares con los que no se cuenta con información detallada y completa de las variables meteorológicas, la plataforma de SWAT presta la información meteorológica suficiente muy detallada sobre la temperatura, precipitación, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa generados a partir de una base global meteorológica.

SPAW

La recolección de información relacionada a suelos se vuelve engorrosa y tardada, debido a que hay que recoger muestras de suelo, llevar a estudios de laboratorio y obtener toda la información necesaria para aplicar el modelo, esa es la manera técnica de caracterizar los suelos, sin embargo en la actualidad hay maneras no tan precisas, pero efectivas de encontrar las características del suelo, con ayuda de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO) y la Base Referencial Mundial (RBW), se permite dar nombres a los tipos de suelos que comparten características en común, con el hecho de saber el nombre del suelo en el que se trabaja es posible encontrar las texturas y los perfiles aproximados de los tipos de suelo. La herramienta SPAW sirve para calcular parámetros del suelo usando solamente la textura del suelo, esta aplicación es de gran ayuda cuando se tiene estudios de suelo inconclusos incluso cuando apenas se conoce el nombre del tipo de suelo que se desea caracterizar (Saxton 2018)

Landsat 8

El programa Landsat tiene sus orígenes desde 1979 que tenía como propósito la vigilancia y monitoreo de la superficie terrestre, la cartografía fue la primera visión de Landsat, desde sus inicios

el programa ofreció una gran mejora con respecto a los datos que recogen sus satélites. Actualmente se cuenta con el satélite Landsat 8; dicho satélite tiene la característica obtener información de Centro América en 4 ocasiones al año. Este satélite tiene la capacidad de captar longitudes de onda mínimas de 0.433 μm y máximas de 12.5 μm en las cuales hay 11 diferentes bandas de radiación (Intituto Geografico Agustin Codazzi 2013). En la tabla 2.9 se muestran los valores de las diferentes bandas de radiación captadas por Landsat 8.

Tabla 2.9: características de las bandas captadas por los sensores del satélite Landsat 8

Banda	Longitud de onda (μm)	Resolución (m)
Banda 1: Aerosol costero	0.43 - 0.45	30
Banda 2: Azul	0.45 - 0.51	30
Banda 3: Verde	0.53 - 0.59	30
Banda 4: Rojo	0.64 - 0.67	30
Banda 5: Infrarrojo cercano NIR	0.85 - 0.88	30
Banda 6: SWIR 1	1.57 - 1.65	30
Banda 7: SWIR 2	2.11 - 2.29	30
Banda 8: Pancromático	0.50 - 0.68	15
Banda 9: Cirrus	1.36 - 1.38	30
Banda 10: Infrarrojo térmico 1	10.60 - 11.19	100
Banda 11: Infrarrojo térmico 2	11.50 - 12.51	100

2.6 Índices de imágenes

Los índices de imágenes son imágenes que se calculan a partir de imágenes multibanda. El resultado de efectuar procesos aritméticos a las bandas espectrales produce nuevas capas que contiene la información que se desea de forma geoespacial, los índices son combinaciones de bandas en las que se permite localizar las variables deseadas. Por ejemplo, un índice de vegetación mostrará la vegetación que está en buen estado con un color brillante en la imagen de índice, mientras que la vegetación que no lo está tendrá valores más bajos y el terreno yermo será oscuro. El valor de un índice de vegetación para un pino en buen estado que está sombreado en un valle será similar al de un pino que está a pleno sol. Están vinculados a bandas concretas que están en partes definidas del espectro electromagnético. Como resultado, es posible que solo sean válidos para ciertos sensores o clases de sensores, y es fundamental que se usen las bandas adecuadas en el cálculo (ESRI s.f.).

2.6.1 Índice NDVI

El índice diferencial de vegetación normalizado (NDVI) es un índice normalizado que permite generar una imagen que muestra el vigor de la vegetación en ese momento, también conocida como biomasa relativa. Este índice aprovecha el contraste de características entre dos bandas de un dataset ráster multiespectral: la absorción de pigmento de clorofila en la banda roja y la alta reflectividad del material de las plantas en la banda infrarroja cercana (NIR) (ESRI s.f.). La ecuación 19 muestra la combinación de banas espectrales necesarias para calcular el índice NDVI.

$$\text{NDVI} = ((\text{Banda 4} - \text{Banda 3}) / (\text{Banda 4} + \text{Banda 3})) \quad \text{Ecuación 19}$$

Este índice científico coloca los valores entre -1,0 y 1,0 para representar la densidad de la vegetación y el vigor. Los valores negativos corresponden principalmente a las nubes, el agua y la nieve, y los valores cercanos a cero corresponden principalmente a las rocas y al terreno desnudo. Los valores muy bajos de NDVI (por debajo de 0,1) corresponden a áreas yermas de rocas, arena o nieve. Los valores moderados representan terrenos con arbustos y prados (0,2 a 0,3), mientras que los valores altos indican bosques de zonas templadas y tropicales (0,6 a 0,8) (ESRI s.f.).

Cambio de vegetación

La acelerada pérdida de los bosques nativos es uno de los principales problemas a los que se enfrenta la humanidad desde principios del siglo XXI (FAO 2001) mientras que en muchos países desarrollados la tasa de deforestación se ha detenido y las áreas de bosque se mantienen cuasi constantes, hay otros países en los que la vegetación está en declive (Hulshoff 1995) Las pérdidas aceleradas de vegetación se encuentran en países subdesarrollados especialmente en los trópicos (Repetto 1988).

CAPITULO III METODOLOGIA

METODOLOGIA

3.1 Ubicación de la investigación

El área de la investigación se llevó a cabo en la microcuenca del río Olominas, ubicada en los municipios de Perquín, Arambala y Joateca en el departamento de Morazán, al Oriente de El Salvador. La microcuenca también tiene parte en la zona conocida como los ex Bolsones que actualmente pertenece al municipio de Yarula departamento de la Paz, Honduras. La Figura 1.1 muestra la ubicación de dicha microcuenca.

La dinámica de la investigación se realizó como muestra la figura 3.1, en el cual se describen los pasos que se siguieron con la finalidad de cumplir los objetivos planteados

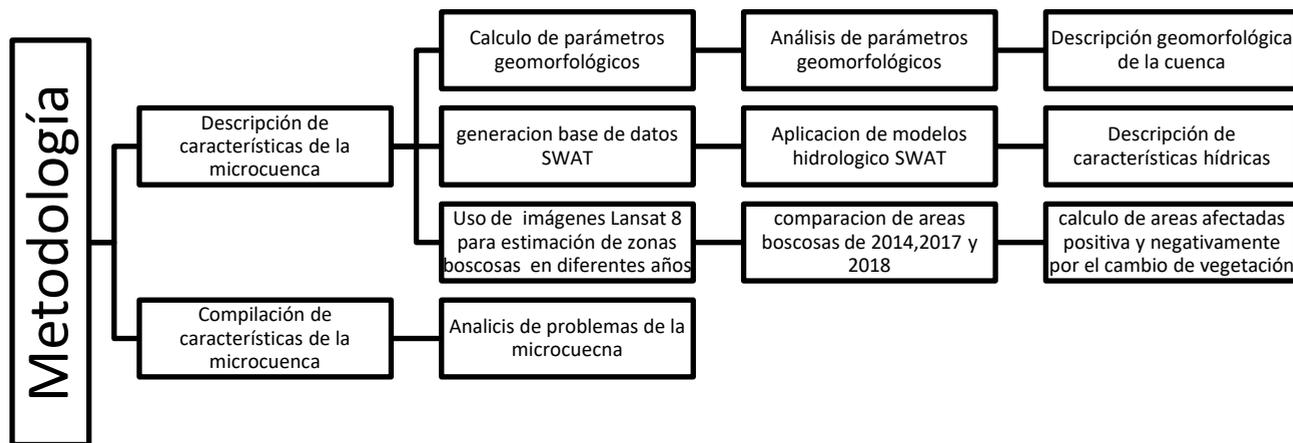


Figura 3.1: metodología de investigación

3.2 Técnicas e instrumentos de medición

La recolección de la información necesaria para el diagnóstico estuvo enfocado en las plataformas libres para solventar la falta de información de la localidad, los datos obtenidos de las plataformas libres aparecen en la tabla 3.4. SWAT, SoildGris y Earth Explorer fueron la mayor fuente de información, el procesamiento se realizó con ARCGIS y QGIS; siguiendo protocolos ya establecidos según los modelos que fueron planteados.

3.3 Geomorfológico

Utilizando sistemas de información geográfica, tomando como fuente un Modelo de Elevación Digital de El Salvador y Honduras, pueden estimar los parámetros geomorfológicos básicos de una cuenca hidrográfica, la tabla 4.1 muestra dichos parámetros

Tabla 3.1 Parámetros geomorfológicos básicos de una cuenca

Descripción	Unidad
Área (A)	Km ²
Perímetro de la cuenca (P)	Km
Perímetro de la cuenca 3D (P3D)	Km ²
Longitud de máximo recorrido (L)	Km
Ancho máximo (B)	Km
Cota máxima (Z _{max})	msnm
Cota mínima (Z _{min})	msnm
X_Centroide	Km
Y_Centroide	Km
Z_centroide	msnm

Los elementos de la tabla 3.1 son la base para la estimación de los parámetros geomorfológicos que describen a la cuenca con más detalle y más específicamente.

Estos valores son unidades espaciales fundamentales como el área de la cuenca, el perímetro de la cuenca, la longitud de máximo recorrido está referida a la distancia mínima que hay entre el punto de cierre de la cuenca y el punto más lejano con respecto a este, el ancho máximo el eje perpendicular más grande con relación a la longitud de máximo recorrido, las cotas indican la mayor y la menor altura con respecto al nivel del mar dentro de la cuenca y los centroides son los puntos centrales de la cuenca.

La tabla 3.2 muestra los índices escalares que se pudieron calcular, utilizando los valores de la tabla 3.1 los cuales tienen el fin de mostrar características específicas de la cuenca, estos valores son unidades que muestran grados de capacidad o deficiencia de la cuenca ante diferentes fenómenos

Tabla 3.2: parámetros geomorfológicos escalares

Descripción	Resultado
Índice de alargamiento (F)	
Factor de forma (Kf)	
Índice de Gravelius (K)	
Coefficiente de masividad (tg)	
Relación de elongación (Kc)	

Además se calcularon los parámetros relacionados con la red de drenaje superficial de la microcuenca los cuales aparecen expresados en la tabla 3.3, estos parámetros relacionan la red de drenaje con la morfología general de la microcuenca

Tabla 3.3: parámetros geomorfológicos relacionados con la red de drenaje

Descripción	Unidad
Longitud del recurso principal(Lcp)	Km
Orden de la red hídrica (N)	UND
Corrientes de orden 1	UND
Longitud de las redes hídricas	Km
Tiempo de concentración (tc)	Horas
Pendiente de cauce principal (Scp)	%
Densidad de Drenaje	1/km
Coefficiente de torrencialidad (Ct)	1/Km ²

Con la información completada, se procedió al analizar la microcuenca para luego describirla para finalizar el diagnóstico.

3.4 Metodología de diagnóstico hidrológico

Para comenzar el diagnóstico se definió la microcuenca utilizando el Software libre de modelación hidrológica QSWAT, el cual utilizo como base para la delimitación de la microcuenca DEM, la delimitación implicó encontrar la red de drenaje más importante de la microcuenca y los límites topográficos de la misma, además por cada río que integra la cuenca que se detectó, se generó el segmento topográfico que alimenta a dicho afluente.

Para generar el diagnóstico hidrológico de la microcuenca del río Olominas fue necesario el procesamiento de información de diferentes metadatos de acceso libre. Debido a la poca información meteorológica y pedológica disponible, el uso de QSWAT permitió generar una gran cantidad de información respectiva a la cuenca. La información que se recopiló para dicho modelo se segmenta en tres tipos:

Primera; meteorológica, la cual fue extraída de la plataforma oficial de SWAT, dicha base tiene datos meteorológicos de precipitación, humedad relativa, radiación solar, temperatura y velocidad del viento desde 1979-2014. La estación meteorológica que se utilizó se llama 139n881w ubicada en las coordenadas 13.89,-88.125 a una elevación de 735 msnm.

Segunda, la pedología o los tipos de suelo se extrajeron de la plataforma libre SoilGrid, la cual utiliza datos globales, para predecir los tipos de suelo, utilizando una gran cantidad de datos físicos, químicos, geográficos, topográficos, meteorológicos, etc. Dicha base de datos utiliza la nomenclatura del sistema Word Reference Base for Soil Resources (WRB).

Tercero, el uso de suelos fue obtenido del mapa de uso de suelos de El Salvador el cual fue publicado el año 2010, dicho mapa indica la vegetación u ocupación que tenía el suelo en el 2010, actualmente no hay otro mapa oficial sobre el uso de suelos diseñado por el país.

Las variables utilizadas para generar el modelo hidrológico en QSWAT aparecen de la tabla 3.4

Tabla 3.4: variables para modelación hidrológica de la microcuenca del río Olominas

Meteorológica	Tipo de suelo	Uso de suelo
Precipitación	Textura	Áreas de pastizales
Temperatura	Z máxima de perfil del suelo	Áreas de vegetación arbustiva
Humedad relativa	Densidad real	Áreas de pinos
Radiación solar	Capacidad de disponibilidad de agua encada horizonte del suelo	Áreas agrícolas
Velocidad del viento	Conductividad hidráulica	Tejidos urbanos
	Cantidad de arcilla , arena y limo	Áreas con agua
	Porcentaje de carbono en el suelo	
	Albedo del suelo	
	Factor USLE de erosión	

La modelación hidrológica se realizó en 2 partes, la primera identificar la información necesaria y luego generar las base de datos y la segunda correr el modelo con dicha información. La falta de recursos para esta investigación impulso a que la búsqueda de información libre para completar la base de dato. Fue necesario identificar los parámetros necesarios para correr el modelo en QSWAT y adentrarse en la bibliografía relacionada para identificar las características de los suelos que se encontraron y la información meteorológica adecuada para dicho modelo. La composición de la base de datos necesaria para crea el modelo hidrológico son: capas Raster de uso de suelos, tipos de suelos, DEM y ríos; Tabla meteorológica con los parámetros diarios de la sección 1 de la tabla 3.4 desde enero 1979 hasta diciembre 2014. La tabla con información sobre los tipos de suelos y sus parámetros de la segunda columna de la tabla 3.4. Tabla con todos los usos que tiene el suelo dentro de la microcuenca del río Olominas

Al completar la base de datos y correr el modelo hidrológico, se obtuvo como resultado el balance hídrico de la microcuenca del río olominas, obteniendo así los datos de entrada y salida de agua de la microcuenca además se obtuvo el hidrógrama en la cuenca en el punto de salida de la microcuenca, observando así el comportamiento del flujo de agua desde 1979 hasta 2014

3.5 Metodología de diagnóstico cambio de vegetación

Este diagnóstico cambio de vegetación está diseñado para observar el cambio de vegetación dentro de la microcuenca del río Olominas. Cabe mencionar que no se busca calcular cuales son las especies o tipos de árboles que han cambiado o se han perdido, solamente se busca tener un panorama general sobre la vegetación en el pasado y la vegetación actual. Haciendo uso de las imágenes del satélite Landsat 8, se descargó desde la plataforma Earth Explorer que pertenece a United State Geological Service (USGS), la banda de infrarrojo cercano (banda 4) y la banda roja (banda 3), la captura que captura el espacio de la microcuenca del río Olominas es LC08_L1TP_018050.

Se buscó las imágenes que mostraran microcuenca sin la intervención de nubes, además se tomaron en cuenta solo las imágenes capturadas en la época seca del año; con estas características solo se pudieron tomar 3 imágenes; la primera, tomada el 13 de marzo del 2014, la segunda; Tomada el 04 de abril del 2017 y la tercera; El 07 de marzo de 2018. Los años 2015 y 2016 presentaban nubes por lo que no fueron tomadas en cuenta.

Una vez descargadas las bandas para cada año, se realizó el proceso para calcular el NDVI para cada año, ya con todos los NDVI calculados, se realizó una resta entre los resultados del 2014 y 2017 también una resta 2014 y 2018. Con los datos obtenidos se calculó las áreas afectadas negativamente y positivamente entre 2014-2017 y 2014-2018 y se rellenó la tabla 3.5

Tabla 3.5: cambio de los bosques en los años 2014-2017 y 2018 en la microcuenca del río Olominas

Año	Área de bosque (Km ²)	2014-2017		2014-2018		2017-2018	
		Positivo	Negativa	Positivo	Negativa	Positivo	Negativa
2014							
2017							
2018							

3.6 Análisis de datos

Cuando se completó los diagnósticos hidrológico, geomorfológico y cambio de vegetación, se formuló la tabla 3.5 incluyendo los resultados obtenidos de los diagnósticos y se analizó, con base a deficiencias que muestren los análisis para poder proponer el mejoramiento en la gestión municipal de la microcuenca. La tabla 3.5 muestra el análisis de la información para la propuesta de mejoramiento de la gestión

Tabla 3. 5: Análisis de problemas para gestión de microcuenca del río Olominas

Problemas	Posibles Causas	Consecuencias	Ubicación	¿A quién afecta?	Alternativas de solución
Hidrológicos	Posible origen del problema	Los efectos que puede o que está acarreado	Descripción general de la ubicación espacial del problema	Componentes del ecosistema que se ve afectado	Alternativas sugeridas por el investigador
Cambio de Vegetación					
Geomorfológico					

CAPITULO IV PRESENTACION DE RESULTADOS PRESENTACION DE RESULTADOS

Siguiendo los pasos metodológicos, el primer paso estuvo enfocado en la descripción de la microcuenca tomando en cuenta la geomorfología, hidrología y la biofísica de la misma. Partiendo desde la geomorfología.

4.1 Resultados geomorfológicos

Utilizando un SIG se definió la cuenca y los parámetros geomorfológicos básicos, en este proceso se usaron dos imágenes de Modelos de Elevación Digital (DEM) obtenidas de la plataforma libre de Earth Explorer, dichas imágenes tienen los códigos de identificación; ID: ASTGDEM2_0N13W089 e ID: ASTGDEM2_0N13W089, estas imágenes son publicadas por NASA/METI y fueron captadas en Octubre del 2011. El anexo 1 muestra los parámetros geomorfológicos básicos de la microcuenca del río Olominas.

Los valores de los parámetros geomorfológicos básicos se muestran en la tabla 4.1, los cuales fueron la base para encontrar los demás parámetros planteados en la metodología utilizando las ecuaciones mencionadas en la sección 2.3

Tabla 4.1: Valores de los parámetros geomorfológicos básicos de la microcuenca del río Olominas

Descripción	Unidad	Resultado
Área (A)	Km ²	28.913
Perímetro de la cuenca (P)	Km	41.947
Perímetro de la cuenca 3D (P3D)	Km ²	42.862
Longitud de máximo recorrido (L)	km	11.244
Ancho máximo (B)	km	4.329
Cota máxima (Zmax)	Msnm	1932.000
Cota mínima (Zmin)	msnm	658.000

X_Centroide	km	598.574
Y_Centroide	km	318.000
Z_centroide	msnm	1333.895

Utilizando las ecuaciones planteadas en la sección 2.3 de este documento, se calcularon los valores de los parámetros geomorfológicos. Como resultado se obtuvieron los valores de la tabla 4.2, la cual contiene los índices escalares y los parámetros geomorfológicos de la redes de drenaje de red de drenaje.

Tabla 4.2: Valores de parámetros geomorfológicos de la microcuenca del río Olominas.

Descripción	Unidad	Resultado
Forma		
Índice de alargamiento (F)		2.597
Factor de forma (Kf)		0.229
Índice de Gravelius (K)		1.936
Coefficiente de masividad (tg)		45.447
Relación de elongación (Kc)		0.612
Latitud		
Altitud Media (Hm)	msnm	1314
Altitud modal (Hf)	msnm	1797
Altitud mediana (Hfm)	msnm	1295
Pendiente		
Pendiente media de la cuenca (Sm)	%	20.500
Pendiente de cauce principal (Scp)	%	11.330
Red Hídrica		
Longitud del recurso principal(Lcp)	Km	13.446
Orden de la red hídrica (N)		3
Corrientes de orden 1		18
tiempo de concentración (tc)	Horas	1.215

Densidad de drenaje	1/km	1.150
Coefficiente de torrencialidad	1/Km^2	0.623

Utilizando información que proviene de los mapas de uso libre del MARN se diseñó un mapa geológico y pedológico de la zona de estudio, estos mapas parecen en el anexo 2 y anexo 3 respectivamente, los valores de pendiente se obtuvieron utilizando DEM y la red de drenaje se clasifico según Horton (1932). Los anexos 4 y 5 muestran los valores de pendientes y la red de drenaje categorizada respectivamente.

4.2 Resultados hidrológicos

La microcuenca del río Olominas, es de vital importancia para los habitantes del municipio de Perquín, por ser su fuente de agua principal para consumo y agricultura, aportando cerca de 1.4 m³/s solo para consumo en los hogares según datos de la Alcaldía Municipal de Perquín, conocer la microcuenca del río Olominas es un incentivo para tomar acciones que ayuden a conservar el buen estado de la cuenca. A continuación se presentan los resultados obtenidos del balance hídrico de la microcuenca del río olominas.

Los datos generales encontrados en la microcuenca del río Olominas sobre vegetación, tipos de suelo aparecen de la tabla 4.3

Parámetro \ Tipo de suelo	Cambisoles haplicos	Luvisoles haplicos	Acrisoles haplicos	Regosoles lepticos
Máxima profundidad del perfil con presencia de raíces (mm)	600	750	270	610
Grupo hídrico	C	C	C	D
Textura	Franco	Franco arcilloso	Franco	franco arenoso limoso
Densidad real(g/cm ³)	1.45	1.43	1.46	1.43
Capacidad de disponibilidad del agua del horizonte de suelo	0.13	0.12	0.13	0.17
Conductividad hidráulica saturada(mm/h)	17.8	2.58	18.66	3.03
Contenido de carbono orgánico %	1.45	1.68	1.45	0.4

Albedo del suelo húmedo	0.22072	0.18809	0.22072	0.45347
Factor Usle de erosionabilidad	0.13	0.13	0.13	0.14
Contenido de arcilla %	19	38	19	72
Contenido de arena %	45	40	49	11
Contenido de limo %	36	22	32	17

En la figura 4.1 se muestra de manera gráfica las variables y los valores involucrados en el balance hídrico de la microcuenca de río Olominas, la imagen fue generada por SWAT. En la tabla 4.4 se muestran los valores mensuales de las variables del balance

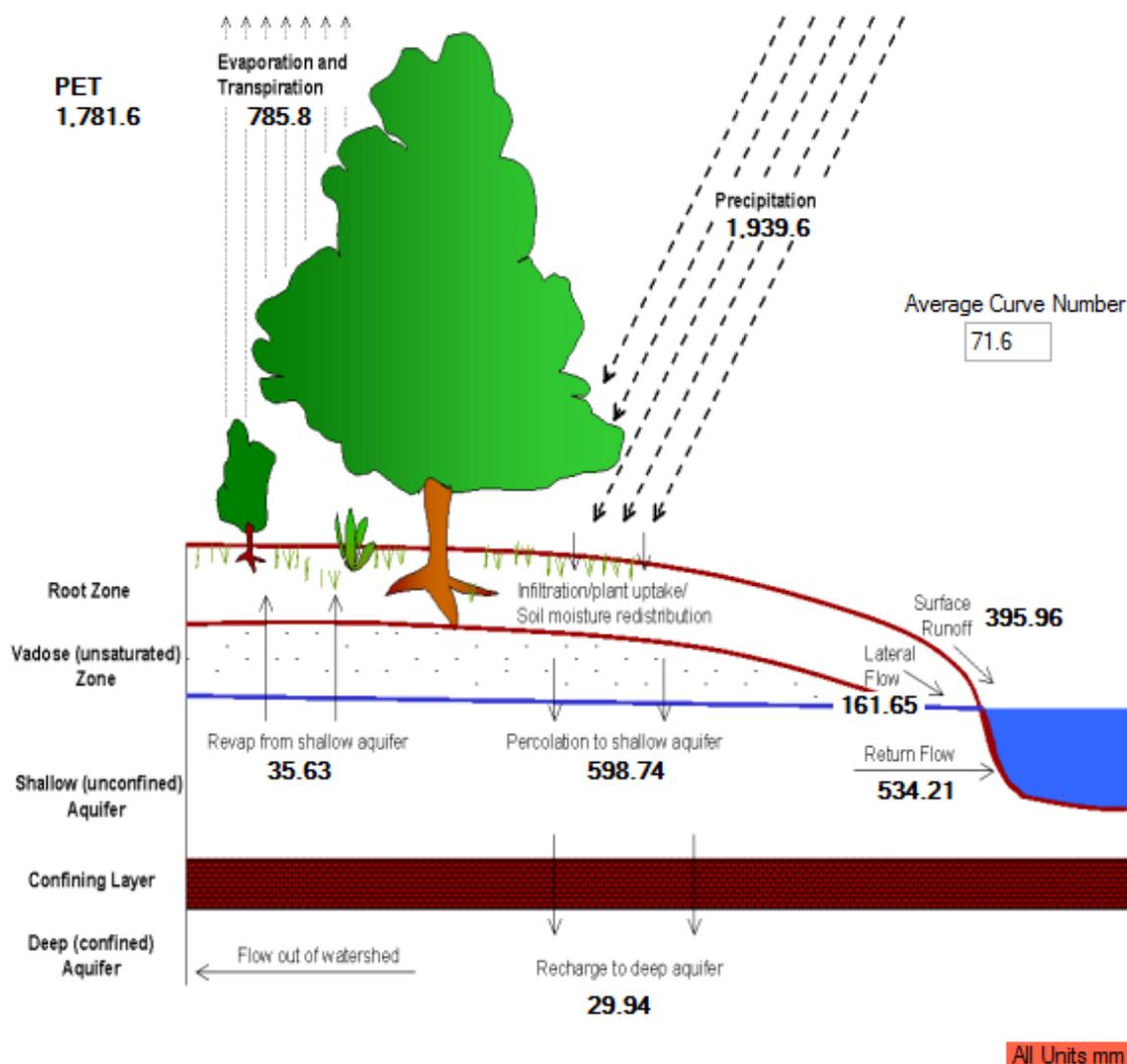


Figura 4.1: Descripción gráfica del balance hídrico anual de la microcuenca del río Olominas, se muestran las variables de entrada y las variables de salida que contribuyen al balance

La figura 4.2 muestra gráficamente el comportamiento de la precipitación en la microcuenca del río olominas a lo largo del año.

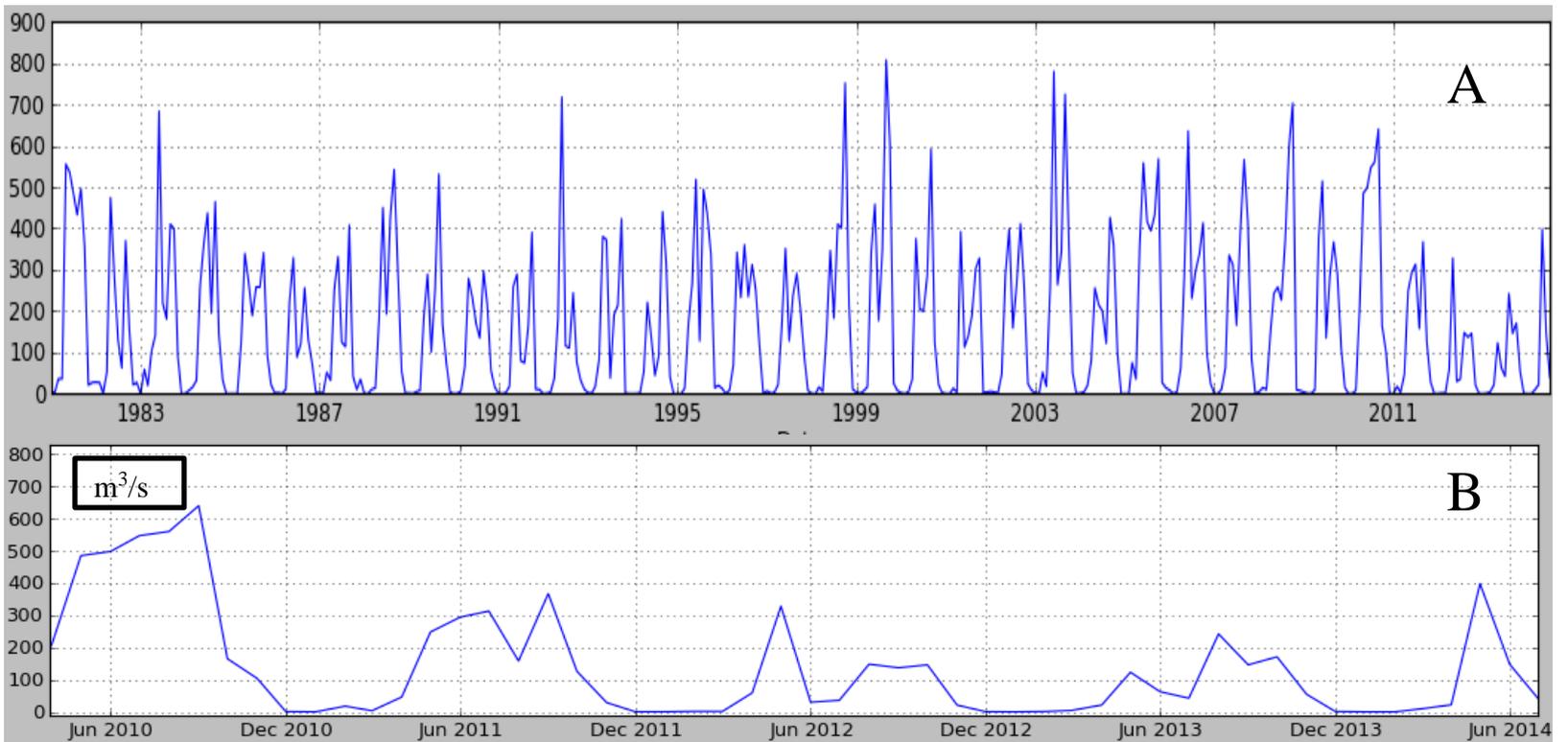
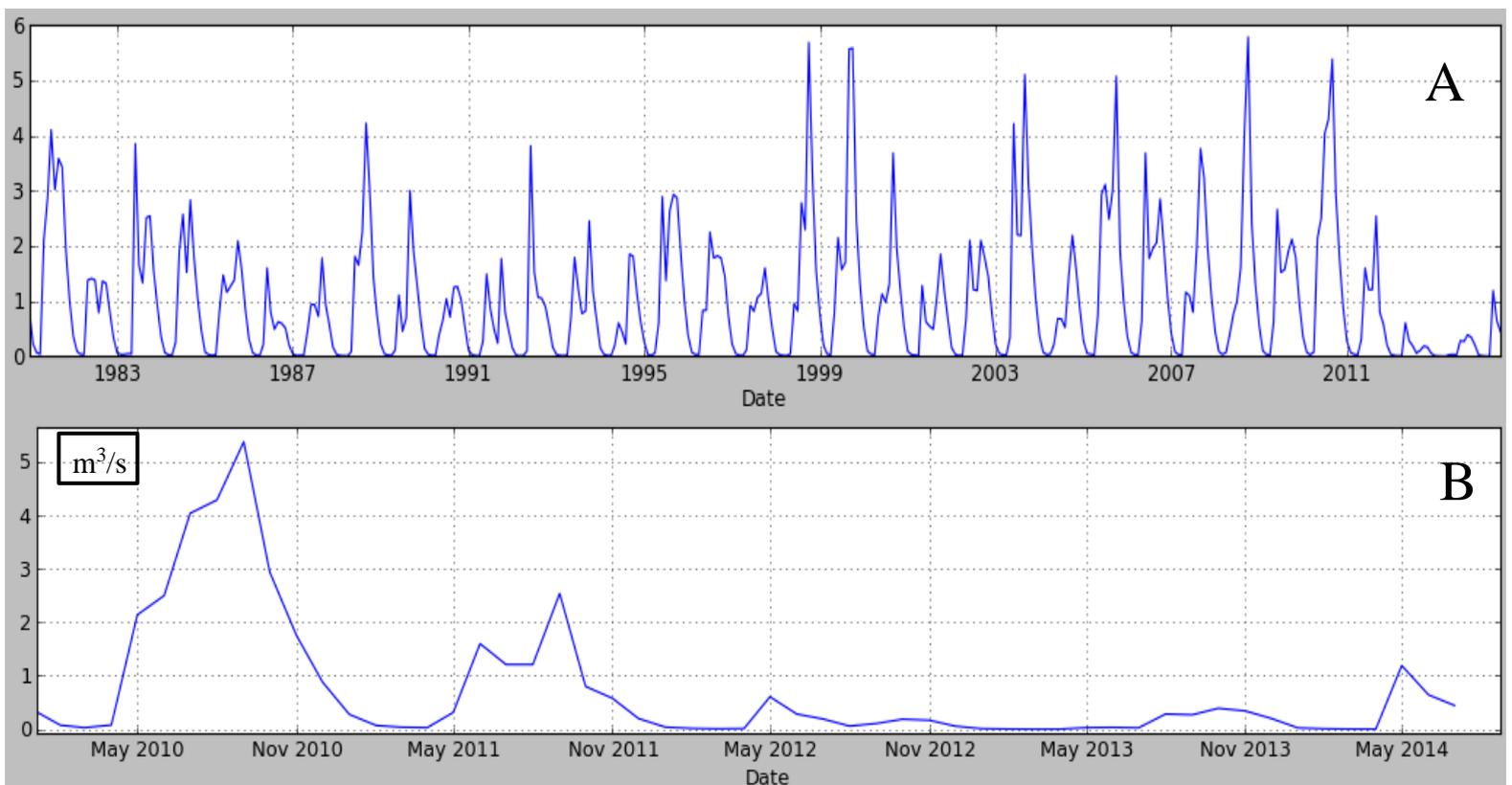


Figura 4.2: comportamiento de las precipitaciones en la microcuenca del río Olominas, en la figura A se observa que los picos anuales normales de precipitación están cerca de los 600 mm de lluvia, en la figura B se observa el comportamiento de la precipitación entre 2010 y 2014, donde los picos de precipitación desde el 2011 disminuyen considerablemente

En la figura 4.3 se muestra el hidrograma del cauce principal del río Olominas que es el cauce principal de la microcuenca del río Olominas.



4.3 Resultados de cambio de vegetación

La vegetación forma parte importante del ciclo hidrológico dentro de una cuenca, por lo cual es importante introducirla dentro de los parámetros a tomar en cuenta a la hora de realizar un balance hídrico, esta importancia se vio reflejada en los resultados de la sección anterior, es este apartada se muestran los resultados del cambio de vegetación, específicamente los cambios que ha sufrido el bosque dentro de la microcuenca del río Olominas desde el 2014 al 2018. La tabla 4.4 muestra los valores de pérdida y ganancia de bosque desde un punto de partida que es el estado del bosque en el 2014.

Tabla 4.4: valores de áreas de bosque en los años 2014,2017 y 2018, la perdida y ganancia del bosque de cada año respecto a los demás dentro de la microcuenca del río Olominas.

Año	Área de bosque (Km ²)	2014-2017 (km ²)		2014-2018 (km ²)		2017-2018 (km ²)	
		Positivo	Negativa	Positivo	Negativa	Positivo	Negativa
2014	22.045056	0.751487	2.24648	0.341784	3.659434	0.214489	1.841362
2017	20.444238						
2018	18.441969						

En el Mapa de uso de suelos del MARN del año 2010 indica que dentro de la microcuenca del río Olominas cerca de 24.5847 km² de bosque en el cual se incluye los bosques principales y los sistemas agroforestal, debido a que se desconoce el protocolo con los que se formuló dicho mapa, no se realizó una comparación entre el mapa del MARN con los datos de las imágenes satelitales. En el Anexo 6 se muestra el mapa de pérdida y ganancia de bosque dentro de la microcuenca del río Olominas en los años, entre los años de estudio.

4.4 Compilación de problemas de la microcuenca del río Olominas

Con los resultados de los diagnósticos hidrológicos, geomorfológicos y el cambio de vegetación, se pueden encontrar problemas generales relacionados a este contexto a los que se enfrenta la

microcuenca del río Olominas, en la tabla 5.5 se hace una referencia a los problemas detectados dentro de la microcuenca y sus posibles efectos y repercusiones además se sugieren los afectados y posibles soluciones.

Tabla 5.5: Análisis de problemas detectados en la microcuenca del río Olominas relacionado a el recurso hídrico.

Problemas	Posibles Causas	Consecuencias	Ubicación	¿A quién afecta?	Alternativas de solución
Disponibilidad de agua	Desde el año 2011 se detectan bajas en la precipitación y aumentos de temperatura, aumentando la evapotranspiración y disminuyendo el agua que se puede captar por lo que se puede acceder disminuye	La falta de agua está generando estrés hídrico en la vegetación y la captación de agua se reduce ya que los acuíferos no se llenan adecuadamente	Este problema es más evidente en la parte sur de la cuenca donde se notan los mayores cambios, sin embargo el problema es general	El afectado más inmediato es la vegetación de la microcuenca pero la población que depende de la microcuenca se puede ver seriamente afectada	Los efectos del cambio climático son un problema imparable en la actualidad, la adaptación es lo más importante, una solución para evitar la escasez de agua es aumentar la retención y almacenamiento para épocas de sequía, usando metodologías como la cosecha de agua.

<p>Descenso de los caudales</p>	<p>La causa principal es la falta de precipitación, también se puede atribuir la disminución de los caudales durante el año, a que la vegetación arbórea se está modificando y la capacidad de retención de los suelos está disminuyendo</p>	<p>La disminución de los caudales es uno de los problemas más serios, la captación de agua para Perquín es de los ríos, si los caudales se reducen, la captación se ve afectada.</p>	<p>La zona que está siendo afectada más rápidamente son los afluentes de orden 1 dentro de la red de drenaje y que son los riachuelos más pequeños y tardan menos en secarse</p>	<p>Como en el caso anterior, los principales afectados, son la vegetación y la población dependiente hídricamente de la microcuenca, pero también afecta las demás microcuencas a las que está conectada, afectando al ciclo hidrológico de la subcuenca del río lempa.</p>	<p>Se sugiere la formación de un mecanismo municipal que se enfoque en la restauración de la vegetación de la microcuenca enfocado en la retención de agua en los perfiles del suelo.</p>
---------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Peligro de inundaciones	El origen de este problema reside en la geomorfología de la microcuenca la cual propicia las condiciones para el rápido aumento de los caudales máximos.	Las inundaciones dentro de la microcuenca afectan al sistema de captación de agua para el municipio de Perquín, produciendo saturación de escombros en los filtros de residuos.	Debido a que el sistema de captación está en la parte norte de la microcuenca, el problema se ubica en esa zona.	Actualmente no se identifican afectados por las inundaciones, debido a que dentro de la microcuenca habitan pocas personas y están alejadas de los ríos con caudales peligrosos, la vegetación también está adaptada es los procesos de inundación.	Para este problema solo resta mejorar la infraestructura del sistema de captación y evitar la construcción de viviendas o estructuras en las cercanías de los ríos o planicies a la altura de los mismos que puedan inundarse en temporada lluviosa.
Cambio de vegetación	Se desconoce el origen de este cambio, pero se le puede atribuir al cambio de uso de suelos por actividad humana o natural,	Aunque la vegetación cambie por causa humana o naturalmente, esto puede afectar a la hidrología de la zona, cuando los bosques	La zona que más se ha visto afectada por los cambios de vegetación es la zona Sur-Oeste de	Como en la microcuenca no habitan personas, no parece haber afectados, sin embargo, si el cambio de vegetación fuese responsable de cambios en	Ejecutar planes de restauración de vegetación adecuada para la retención de agua especialmente en la parte más afectada por el cambio de vegetación y generar una base

	como la agricultura o por la plaga que afecta a los pinos desde 2015, el gorgojo descortezador.	grandes se degradan, se puede ver afectada la retención de agua en el suelo, esto modifica el balance normal.	la microcuenca, donde la mayoría de la vegetación arbórea principal parece estar afectada.	el ciclo hidrológico de la microcuenca, los afectados directos serán todos los organismos dependientes del agua de la cuenca	de datos que permita monitorear los cambios positivos y negativos de la microcuenca, de manera anual.
--	-------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------

CAPITULO V DISCUSIÓN DE RESULTADOS

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se dedica a discutir los resultados correspondientes al capítulo IV contrastando la información obtenida con otras investigaciones relacionadas, como resultado de la discusión se tiene una idea más clara de las características de la microcuenca.

5.1 Análisis geomorfológico

Utilizando los resultados geomorfológicos encontrados en la microcuenca del río Olominas

Índice de Gravelius: Con el valor de índice de gravelius obtenido de 1.93 que indica una cuenca rectangular oblonga, según (Aguilar 2011), las cuencas oval oblonga y rectangular oblonga tienden a desalojar con la mayoría de agua que les llega, lo que da lugar a altas probabilidades de aumento rápido del caudal del río con precipitaciones tipo temporal.

Índice de alargamiento: con un valor de 2.59 la cuenca se categoriza como moderadamente alargada, según Aguilar (2011) este valor indica valores erosivos que arrastran cantidades de sedimentos de la zona alta de la cuenca, los suficientemente grandes como para producir acumulación en la zona media de la cuenca y modificar el cauce del río y ensanchar su flujo en esta etapa, sin embargo, el tipo de suelos de la microcuenca del río Olominas en la que predominan en su mayoría suelos franco arcillosos muy resistentes a la erosión química y con cobertura vegetal abundante a los costados del cauce del río Olominas, la erosión más notable en la cuenca solo se observa en la parte baja, donde se ubican francos rojizos, los cuales sucumben más fácilmente a la erosión, y prueba de ello es su morfología, muy cercana al nivel del río y con pendientes muy bajas.

Factor de forma este parámetro está fuertemente relacionado con la dinámica de la escorrentía dentro de la microcuenca, el resultado obtenido fue de 0.229, según Horton (1945) se categorizada como una cuenca alargada, lo que indica que el tiempo de concentración de la cuenca relativamente prolongado.

Coefficiente de masividad: Para la microcuenca del río olominas existe un coeficiente de masividad de 45.07 lo que indica que es una cuenca montañosa, lo cual es fácil comprobable, debido a que toda la zona norte de El Salvador presenta relieve montañoso.

Relación de Elongación: este parámetro indica si la topografía de la cuenca es plana o pronunciada, el valor de la relación de elongación para la microcuenca fue de 0.621, según (Villa 2006) cuanto mayor es el valor de la relación de elongación, más pronunciado o escarpado es el relieve de una cuenca, cuando el valor de relación alcanza valores mayores a 0.6 se considera a la cuenca como pronunciada.

Pendiente media el valor de este parámetro para la microcuenca fue del 20.5% según Aguilar (2011) los valores entre 15% y 25% se considera como terreno accidentado, este factor indica que hay abundantes zonas de ladera y barrancos, este resultado contrasta con el coeficiente de masividad

Orden de corriente la clasificación de corrientes se realizó siguiendo la metodología Strahler (1957), el proceso se realizó de manera manual, la microcuenca alcanzó un orden de corriente de 3 y 18 tributarios de orden 1.

Densidad de drenaje: Este parámetro tiene un valor de 1.15 km^{-1} indicando que la cuenca cuenta con suelos relativamente impermeables según Robert Horton (1945), el valor de la impermeabilidad del suelo en una cuenca crece con el valor de la densidad de drenaje.

5.2 Análisis balance hídrico

Balance hídrico: Con los resultados del balance hídrico podemos observar los valores de las variables de entrada y salida, de los 1939.6 mm de precipitación que recibe la microcuenca, la variable de salida más importante es la evapotranspiración con 785.8 mm, la escorrentía 395.96 mm, flujo de retorno 534.65 mm, flujo lateral 161.65 mm y recarga al acuífero profundo 29.94 mm, como resultado al igualar las entradas y las salidas, se obtiene un déficit de -3.59 mm, es decir que en la cuenca sufre de escasez en algún punto del ciclo hidrológico, la mayor pérdida de esta precipitación es debido a la evapotranspiración, estos altos valores de evapotranspiración se deben a el tipo

de vegetación encontrado en la microcuenca, según MARN (2010) gran parte de la microcuenca cuenta con bosque preñefolio es decir que mantiene sus hojas verdes todo el año, lo cual lleva a una alta tasa de intercepción (almacenamiento del suelo) por parte de la vegetación además la evaporación del agua en superficie del suelo; es decir que generalmente de la precipitación recibida anualmente un 40.5% es devuelta a la atmósfera en forma de vapor de agua, el resto del agua llega al suelo del cual cerca del 50.8% se retiene gracias a la infiltración, el resto de agua es dirigida a los flujos en forma de escorrentías temporales, ríos y quebradas y flujo lateral el cual es suministrado por el agua antes infiltrada; hasta llegar al punto de cierre en el cauce principal del río. Los valores presentados en la figura 4.1 son valores anuales, los resultados mensuales se presentan en anexo 5.

Precipitación: La lluvia al ser la fuente principal de agua para la microcuenca del río Olominas indica el agua con la que cuenta la cuenca anualmente ya que no se haya ningún tipo de uso en la microcuenca y el mapa hidrogeológico de ANDA sugiere que la profundidad de los acuíferos subterráneos está cerca de los 200 metros de profundidad, la única fuente clara de agua para la microcuenca es la precipitación, anualmente precipitan cerca de 1939 mm de agua sobre la microcuenca del río Olominas, la figura 4.2 muestra la distribución de la lluvia a lo largo del año, cabe en la parte A se observan ciclos en los que las precipitaciones anuales disminuyen y otros en los que las precipitaciones anuales aumentan, sin embargo hasta el 2010 estas altas y bajas se encuentran dentro de valores normales, desde el 2011 hasta el 2014 se observan valores máximos anuales de precipitación menores 300 mm en la temporada lluviosa, dichos valores están a menos de la mitad de los valores normales.

Caudales: Gracias a los 35 años de datos meteorológicos que almacena SWAT en sus bases de datos se puede dar una buena muestra del comportamiento de los caudales en la microcuenca del río Olominas, en la figura 4.3 se observa como se comporta el caudal del cauce principal de la microcuenca del río Olominas, los valores de caudal en época lluviosa oscilan normalmente entre 6 m³/s a 2 m³/s, y se observan períodos de años de caudales altos y otros de caudales bajos los cuales podrían estar relacionados los fenómenos de variabilidad climática como el niño y la niña, sin embargo como se muestra en la figura 4.2 en la parte B hay un descenso abrupto de los caudales desde

el 2011 hasta el 2014, los cuales posiblemente siguen tratándose de afectos del niño, pero mostrando valores más bajos que otros años al punto de tener valores máximos de caudal menores a $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$.

Temperatura: El modelo de SWAT muestra que hasta el 2010 las temperaturas máximas que oscilaban entre $26 \text{ }^\circ\text{C}$ y $34 \text{ }^\circ\text{C}$ y mínimas de 16°C a 20°C , con temperaturas promedio diarias entre 22°C y 27.5°C , sin embargo los valores de 2011 en adelante se ven diferentes, llegando a alcanzar temperaturas promedio que van desde 24°C hasta $30 \text{ }^\circ\text{C}$, teniendo temperaturas máximas de $38 \text{ }^\circ\text{C}$ y mínimas superiores a los $22 \text{ }^\circ\text{C}$

5.3 Análisis cambio de vegetación

Si se toma como parámetro inicial los datos de bosque del año 2014 el área total de bosques es 22.045056 Km^2 ahora bien, significa que entre el año 2014 y el 2017 hubo una pérdida de 5.53% de la vegetación boscosa y un 12.46% entre los años 2014 y 2018 dentro de la microcuenca, y de manera independiente al calcular directamente las pérdidas entre el 2017 y el 2018, las pérdidas de bosque total ascienden a 6.92 %, la pérdida de bosque 2017-2018 es mayor que la pérdida 2014-2017, en este caso se sustenta el comentario de Repetto (1988) sobre la aceleración de la pérdida de los bosques en la zona de los trópicos.

5.4 Análisis de problemas detectados en la microcuenca del río Olominas

Dentro de la microcuenca hay problemas que de afectación general como las bajas en las precipitaciones, ya que es un fenómeno global no hay nada que se pueda hacer para mejorar esos valores, sin embargo los demás problemas planteados parecen tener una solución que permitirá aminorar los efectos negativos de las bajas precipitaciones, que es proporcionar al suelo las herramientas para mejorar la retención de agua, algunas ideas que se plantean son la cosecha de agua en zonas de poca infiltración como una opción de abastecimiento en caso de que la fuente de captación principal se vea afectada por la disminución de los caudales, también se propone la siembra de vegetación enfocada en la retención de agua.

CAPÍTULO VI CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

Conclusiones de diagnóstico

La microcuenca transfronteriza del río Olominas recibe $5.61 \times 10^7 \text{ m}^3$ de agua por precipitación anualmente, de esta agua la microcuenca, solamente tiene la capacidad de almacenar $1.8177 \times 10^7 \text{ m}^3$ el equivalente al 32 % se almacena en forma de agua infiltrada y en el acuífero profundo, durante el ciclo se observan un déficit de $1.04 \times 10^5 \text{ m}^3$ siendo el 0.57 % de la recarga potencial, como consecuencia se observa que el caudal del río Olominas es $0.0 \text{ m}^3/\text{s}$ en algún momento de la temporada seca, generalmente no se sobrepasa un mes en la mayoría de los casos, las temperaturas medias oscilan entre $22^\circ\text{C} - 27.5^\circ\text{C}$, mínimas de 16°C a 20°C con un aumento de 2°C entre 1979 y 2014, máximas de 26°C a 34°C , con aumento de 4°C entre 1979 y 2014; los caudales del punto de cierre de la microcuenca indica que en temporada de lluvias hay caudales que van desde $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ hasta $5.8 \text{ m}^3/\text{s}$ en la mayoría de los casos los caudales máximos ocurren en septiembre, en temporada seca los caudales disminuyen hasta los $0.0 \text{ m}^3/\text{s}$, la retención de agua por infiltración ocurre en la mayoría de los casos en los meses de mayo a octubre, los valores de evapotranspiración oscilan entre 220 mm y 91 mm, los mayores valores de evapotranspiración coinciden con los meses lluviosos.

La geomorfología de la microcuenca transfronteriza del río Olominas mostro en primera instancia las capacidades la misma, los parámetros funcionaron como una vista general de lo que se podía esperar de la microcuenca, estos valores ayudaron marcar un punto de partida para el diagnóstico hidrológico, el índice de Gravelius indico su forma era rectangular oblonga, sugiriendo que la microcuenca tiende a desalojar rápidamente la precipitación que le llega, el índice de alargamiento encontrado mostro que la microcuenca es moderadamente alargada, que indica efectos erosivos que arrastran cantidades de sedimentos de la zona alta de la cuenca, los suficientemente grandes como para producir acumulación en la zona media de la cuenca y modificar el cauce del río y ensanchar su flujo en esta etapa, el factor de forma indica que la microcuenca es alargada, este

resultado sugiere que el tiempo de concentración es relativamente prolongado, según el índice de masividad, la microcuenca es montañosa con terrenos accidentados y topografía pronunciada, la densidad de drenaje es 1.15 km^{-1} , según las metodologías utilizadas para el cálculo de los parámetros este valor indica que la microcuenca es relativamente impermeable, lo cual contrasta con el índice de Gravelius.

El balance hídrico mostro la distribución promedio del recurso agua en las diferentes variables hidrológicas dentro de a microcuenca transfronteriza de río Olominas, la entrada principal de agua a la cuenca son 1939.6 mm de precipitación promedio anual, la salida principal son 785.8 mm de evapotranspiración, 534.21 mm de flujo lateral, 395.96 mm en forma de escorrentía, y 29.94 mm que son recargados al acuífero profundo, el mecanismo de retención principal de agua es la infiltración en la cual se acumulan cerca de 598.74 mm anuales y otros 35.63 mm pos la reaparición de pequeños acuíferos superficiales.

El cambio de vegetación obtenido utilizando los índices NDVI, indico las diferencias en la vegetación verde entre un año y otro, como resultado se observa que en los años que se compararon, el año en que la vegetación se observa más saludable es 2014, con 22.045 Km^2 de vegetación saludable, es decir, el 76.2% del área de la cuenca, en el 2017 se observa 70.7% de vegetación saludable y el 2018 solo 63.7%, en todos los casos hay valores de perdida y valores de recuperación, no hay manera de realizar una comparación directa entre la salud de vegetación y los datos hidrológicos ya los años tomados para análisis son diferentes y solo se tiene el año 2014 como punto de intercesión entre un estudio y otro

Bibliografía

- Aguilar, Victor M. Salas. «Morfometris de la cuenca del río Nazas-Rodeo de Durango, Mexico, aplicado a tecnologia geoespacial.» *Medio ambiente y desarrollo sustentable*, 2011: 34-42.
- Alvarado, Cesar. «Cuencas .» Clase , San Salvador, 2015.
- Andres Iroume, Aton Huber. «Intercepción de las lluvias por la cubierta de bosques y efecto en los caudales de crecida en una cuenca experimental en Malalcahuello, IX Región, Chile.» Artículo Científico, 1999.
- Batres, César Alvarado. «HIDROGEOLOGIA, ACUÍFEROS.» Clase , San Salvador, 2015.
- Bustos, Jhan Pool Elías Díaz. «Determinación de la disponibilidad hídrica superficial mediante balance hídrico en la Cuenca del Río Cumbaza-San Martín, 2016.» Tesis, Tarapoto, 2017.
- Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza . *Caracterización, diagnóstico, línea base y Zonificación Territorial de la Cuenca del Río Jesús Maía* . Tecnico , Turrialba: CATIE, 2011.
- David Keith Tood, Ph. D. *Hidrología* . Madrid : Paraninfo, España, 1873.
- Dirección General de Infraestructura Agraria y Riego . «Manual N°5 Medición de Agua.» Tecnico , San Isidro, Lima, 2015.
- encolombia. *Balance Hídrico Nacional*. s.f. <https://encolombia.com/medio-ambiente/interesa/estudio-agua/estudiocolombianoaguas1/> (último acceso: 19 de marzo de 2018).
- ESRI. *ArcGis Pro*. s.f. <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/help/data/imagery/indices-gallery.htm> (último acceso: 12 de Febrero de 2019).
- FAO. «Situación de los bosques del mundo.» Roma, 2001.
- Figueredo, Fabian Gonzalo Cárdenas. *Topografía de una Cuenca*. Tecnico, Sogamoso: N/A, 2016.
- Galvez, Dr. Juan Julio Ordoñez. «SlideShare.» *¿Que es una cuenca hidrologica?* 2011. <https://es.slideshare.net/DanielDelgado2/qu-es-una-cuenca-hidrologica> (último acceso: 06 de marzo de 2018).
- Horton, Robert. «Drainage-Basin Characteristics.» *Transactions, American Geophysical Union*, 1932.

Horton, Robert E. *EROSIONAL, DEVELOPMENT OF STREAMS AND THEIR DRAINS AGE BASINS; HYDROPHYSICAL APROBACH TO CUANTITATIVE MORPHOLOGY*. GEOSCIENCEWORLD, 1945.

Horton, Robert. «Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology.» *Bolletín of the geological society of america*, 1945: 275-370.

Huber, Oyarzún. «BALANCE HIDRICO EN TRES PLANTACIONES DE *Pinus radiata*.» Artículo Científico, 1984.

Hulshoff, Mr. «Landscape indices describing a Dutch landscape.» *Landscape Ecology 10*., 1995: 101-111.

Instituto Geografico Agustin Codazzi. *Descripción y Corrección de Productos Landsat 8*. Bogota, Colombia: Landsat Data Continuity Mission, 2013.

Intituto Geografico Agustin Codazzi. *Descripción y Corrección de Productos Landsat 8*. Bogota, Colombia: Landsat Data Continuity Mission, 2013.

J. Faustino, F. Jiménez. «Manejo de Cuencas Hidrograficas.» 2000.

<https://books.google.com.sv/books?id=99oOAQAIAAJ&printsec=frontcover&dq=cuencas&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwjh2cXkvdjZAhWIy1MKHe-FAH4Q6AEIKjAB#v=onepage&q=cuencas&f=false> (último acceso: 6 de marzo de 2018).

Jiménez, Julio Muñoz. *Geomorfología general*. Madrid: Síntesis, 1995.

Kraemer, Felipe Behrends. «aplicacion del modelo hidrológico-swat en una microcuenca agrícola de la pampa ondulada.» artículo , San Martín, Buenos Aires, Argentina, 2011.

Mascareño, Leandro. *Los acuíferos*. 04 de Noviembre de 2016.

<http://www.universidad.com.ar/acuiferos> (último acceso: 09 de Marzo de 2018).

Mijares, Francisco J. *Fundamentos de Hidrología de superficie* . Mexico, D. F.: LIMUSA, 1989.

Mimenza, Oscar Castellero. *Psicología y Mente*. 30 de mayo de 2017.

<https://psicologiymente.net/miscelanea/tipos-de-investigacion> (último acceso: 27 de abril de 2018).

- Morán, Elisa Colom de. *Estado legal de las Cuencas Transfronterizas en Centro America* . Informativo , Guatemala : Serviprensa S.A., 2014.
- Perquin, Alcaldia municipal de. «Plan de seguridad del Agua Perquin.» 2016.
- Po Chi Fung. *Aventure River Wastershed Council*. 2018. <http://venturawatershed.org/our-watershed/attachment/3d-watershed-from-web> (último acceso: 09 de Marzo de 2018).
- Repetto, R. «The Extent and Rate of Deforestation.» *Public Policies and the Misuse*, 1988: 2-15.
- Rico, H. *Características del gran grupo de suelo latosoles arcillo rojizos de El Salvador*. Memoria In 8. Reunión Centroamericana., San Jose: Programa Cooperativo Centroamericano para el Mejoramiento del Maiz, 1962.
- S.A.DE.C.V, Iniciativa Consultores. «Plan de Ordenamiento Del Recurso Hídrico Del Municipio De Perquín.» Piloto, Perquin, 2016.
- Santayana, Sebastian. *Introduccion al Ciclo Hidrologico*. Interpretado por Sebastian Santayana. Lima. 2010.
- Saxton, Keith E. «Soil-Plant-Ari-Water.» Washington DC: USDA Agricultural Research Sevice, 2018.
- Schosinsky, Gunther. «CÁLCULO DE LA RECARGA POTENCIAL DE ACUÍFEROS MEDIANTE UN BALANCE HÍDRICO DE SUELOS.» *Revista Geológica de América Central*, 2006: 18-19.
- Schosinsky, Marcelino Losilla y Gunther. «MODELO ANALÍTICO PARA DETERMINAR LA INFILTRACIÓN CON BASE EN LA LLUVIA MENSUAL.» *Revista Geológica de América Central*, 2000: 02-04.
- Sergio Fatorreli, Pedro C. Fernández. *DISEÑO HIDROLOGICO*. Zaragoza: Publicacion Virtual Water Assessment & Advisory Global Network, 2011.
- Strahler, Artur N. «Quantitative analysis of wastershed geomophology.» *American Geophysical Union*, 1957: 6-14.

Universidad Complutense de Madrid. *Escorrentia subterranea*. s.f.

http://webs.ucm.es/info/diciex/proyectos/agua/esc_sub_acuifero.html (último acceso: 09 de Marzo de 2018).

Uribe, Natalia. *Conceptos basicos y guia rapida para el usuario*. Centro Internacional de Agricultura Tropical , 2010.

Villa, Agustín Felipe Braña Puyol y Marco Antonio Jacobo. *Principios y Fundamentos de la Hidrologia Superficial*. Ciudad de Mexico: Universidad Autónoma Metropolitana , 2006.

Villarán, Rubén F. «UTILIZACIÓN DEL PROGRAMA “SWAT” PARA LA ESTIMACIÓN DE LA EMISIÓN DE SEDIMENTOS EN CUENCAS.» 2017: 21-32.

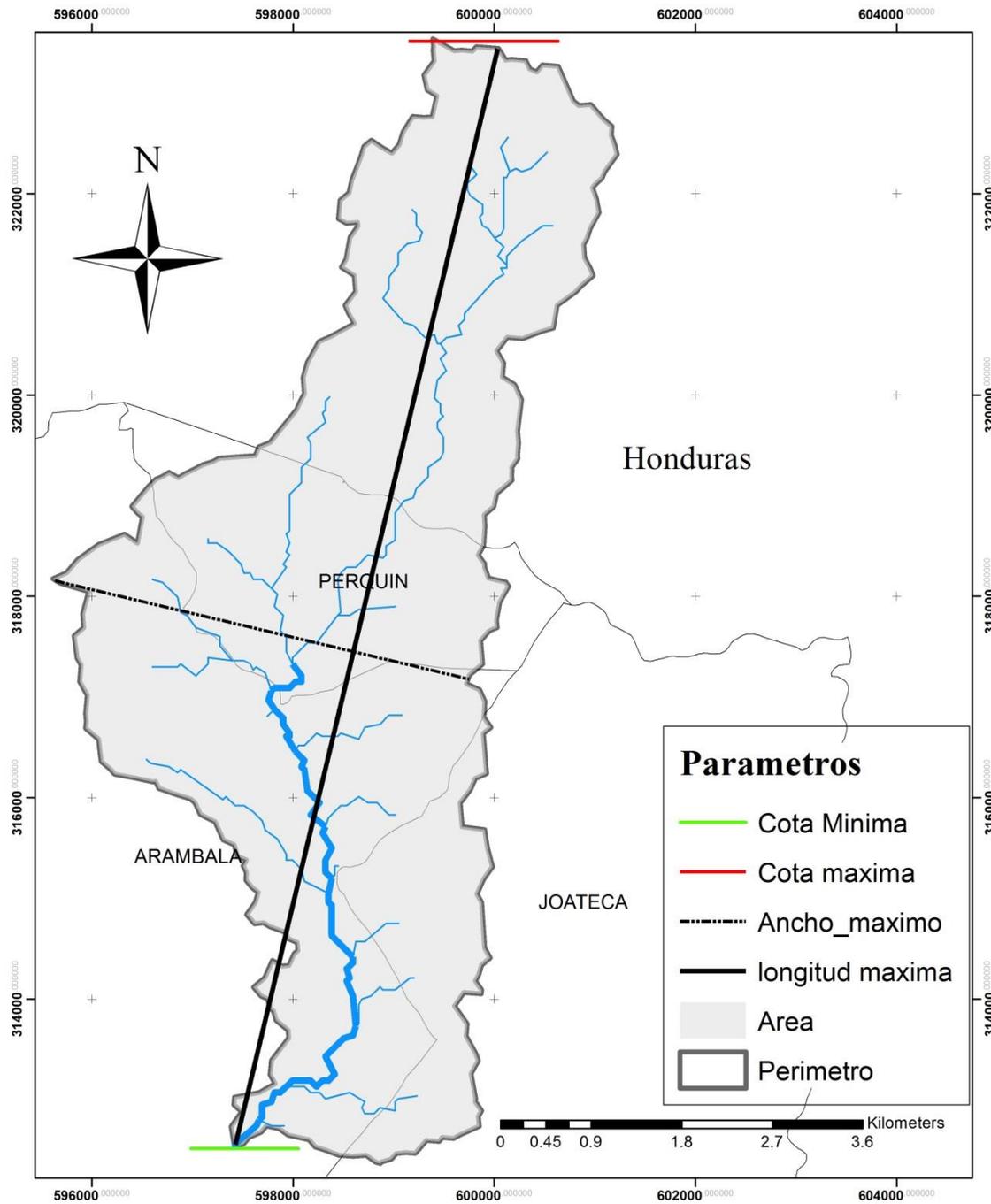
Watler, Willian. *Bases Conceptuales del Manejo, la Gestión y Cogestión de Cuencas Hidrográficas*. CATIE, 2017.

Worschitz, Rodolfo O. «TOPOGRAFÍA E HIDROGRAFÍA.» material de curso, Buenos Aires , s.f.

ANEXOS

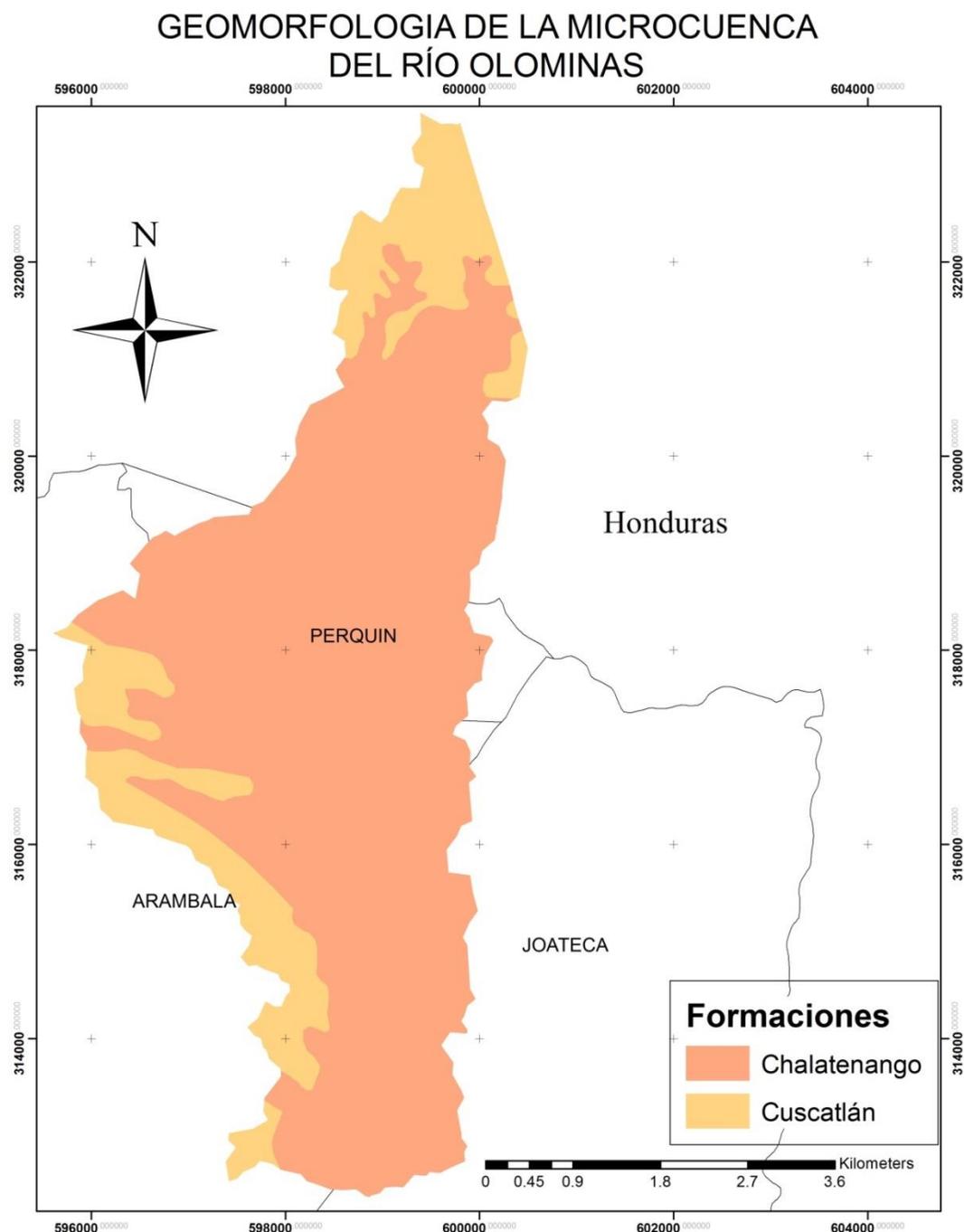
Anexo 1

GEOMORFOLOGIA DE LA MICROCUENCA DEL RÍO OLOMINAS



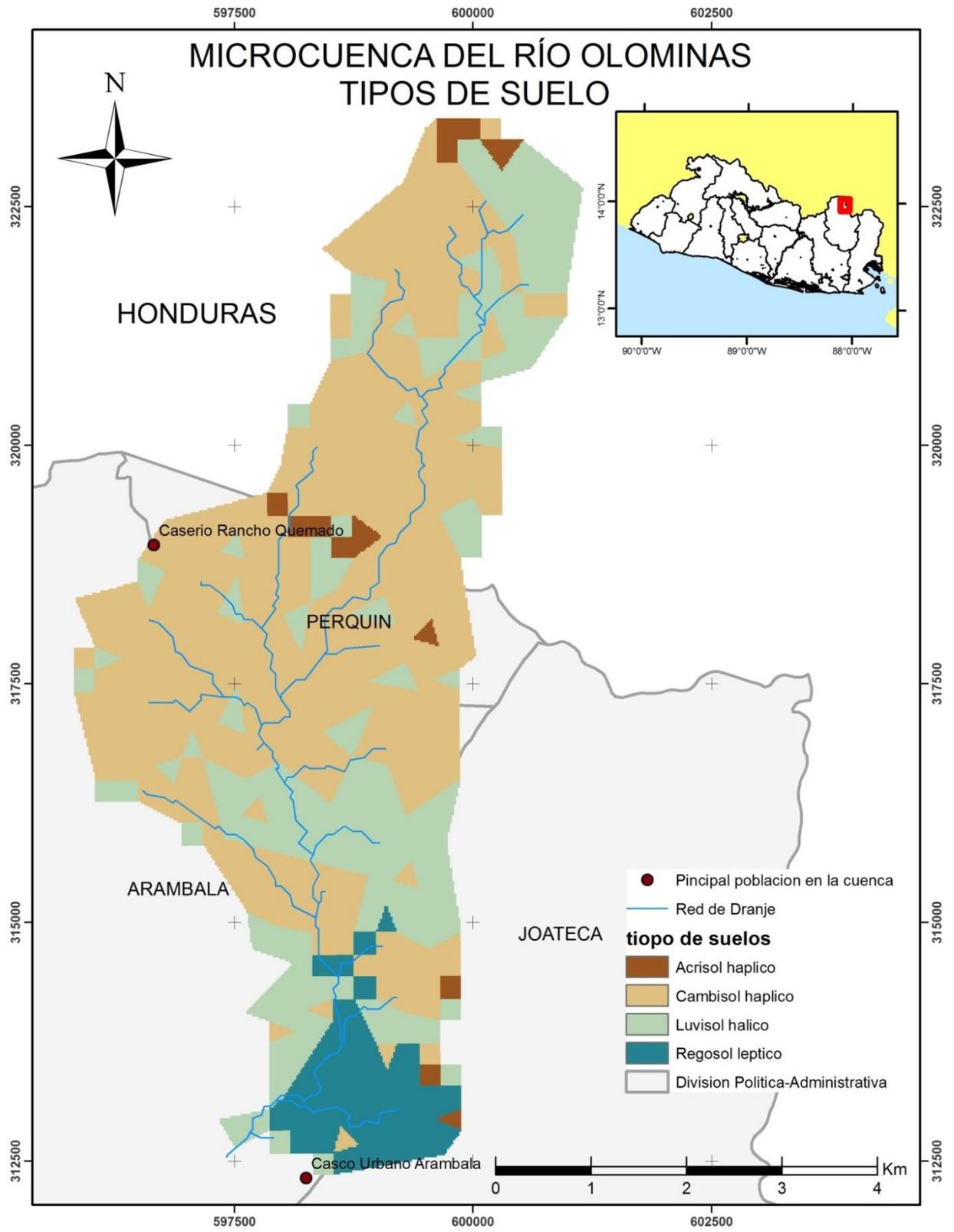
Parámetros geomorfológicos básicos: En este mapa se muestran los parámetros geomorfológicos que sirvieron de base para obtener el resto de parámetros que ayudaron a construir la descripción de de la microcuenca del río olominas, los valores de estos parámetros aparecen en la tabla 4.1

Anexo 2

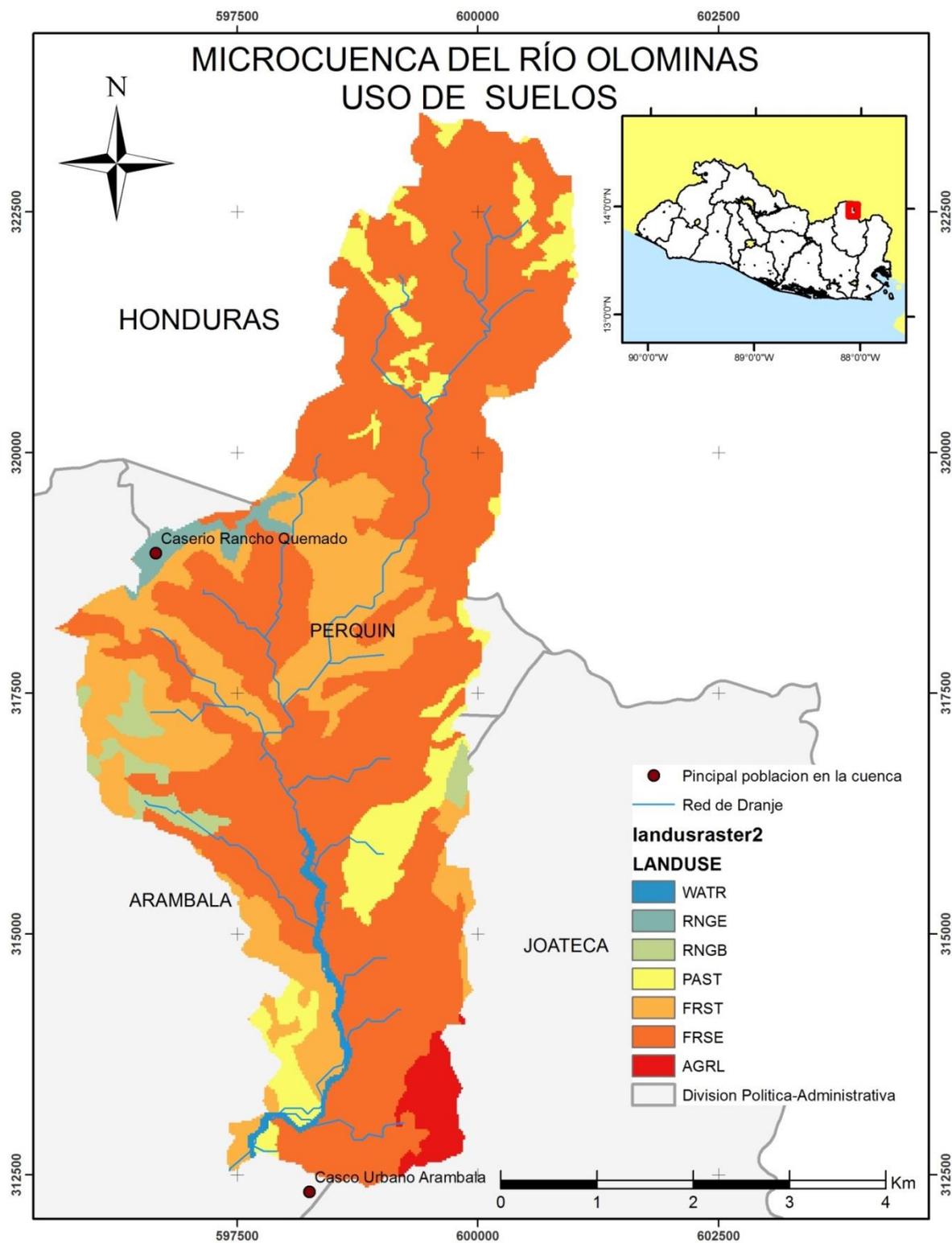


Geología de la microcuenca del río Olominas: dentro de la microcuenca solo se encuentran 2 tipos de formaciones geológicas, según Léxico Estratigráfico de El Salvador (1984) la formación Chalatenango (ch1) está formada por rocas volcánicas acidas piroclásticas, ignimbritas y epiclastitas; la formación Cuscatlán (c1) está formada por unidades sedimentarias de origen fluvio-lacustres y volcánico

Anexo 3



Anexo 4



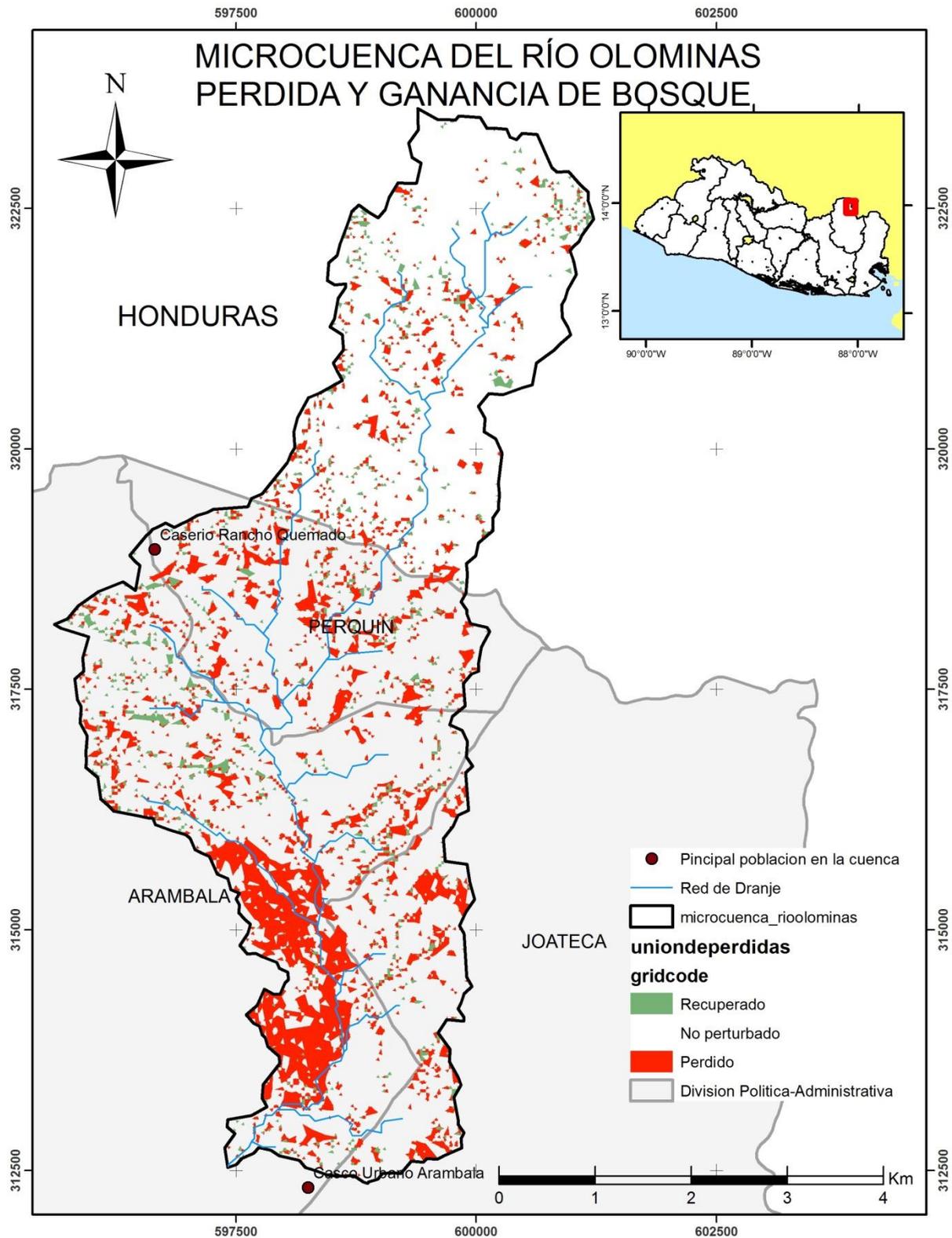
Uso de suelos en la microcuenca del río Olominas, dentro de esta predomina el Bosque de pino-roble, además en la franja sur se practica la agricultura ya que la topografía y el tipo de suelo lo permiten, solamente en la parte Norte-oeste se encuentran poblaciones dentro de la microcuenca

Anexo 5

Tabla 4.4: valores mensuales de las variables de entrada y salida del balance hídrico de la microcuenca del río Olominas

Mon	Rain (MM)	Snow Fall (MM)	SURF Q (MM)	LAT Q (MM)	Water Yield (MM)	ET (MM)	Sed. Yield (MM)	PET (MM)
1	2.69	0.00	0.00	3.29	24.58	7.09	0.00	170.61
2	4.64	0.00	0.00	1.33	5.17	7.33	0.00	164.57
3	13.09	0.00	0.00	0.90	2.84	30.29	0.00	183.90
4	53.51	0.00	0.02	1.41	2.77	41.12	0.00	160.23
5	292.13	0.00	44.46	9.50	56.80	93.05	0.13	136.12
6	359.19	0.00	92.27	24.38	154.69	109.09	0.26	130.94
7	191.45	0.00	30.04	20.86	127.86	108.31	0.07	155.13
8	255.33	0.00	42.57	18.61	132.00	108.57	0.10	144.38
9	405.64	0.00	108.65	26.12	210.82	97.88	0.18	116.06
10	304.38	0.00	75.42	31.38	220.26	93.96	0.11	122.26
11	55.07	0.00	4.43	17.22	125.30	60.12	0.01	136.20
12	8.85	0.00	0.00	7.61	67.59	30.79	0.00	157.77

Anexo 6



Cambio de vegetación dentro de la microcuenca del río Olominas, se observan los parches de bosque perdidos y recuperados en los años 2014-2018