

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA  
ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL

ATLAS DIGITAL DE LAS SUBCUENCAS BIRRÍS Y PÁEZ,  
CARTAGO, COSTA RICA

TRABAJO DE GRADUACIÓN PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERA  
FORESTAL CON EL GRADO ACADÉMICO DE LICENCIATURA.

MARÍA MONSERRATH AGUILAR TORRES

CARTAGO, COSTA RICA

2021



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA  
ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL

ATLAS DIGITAL DE LAS SUBCUENCAS BIRRÍS Y PÁEZ,  
CARTAGO, COSTA RICA

TRABAJO DE GRADUACIÓN PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERA  
FORESTAL CON EL GRADO ACADÉMICO DE LICENCIATURA.

MARÍA MONSERRATH AGUILAR TORRES

CARTAGO, COSTA RICA, 2021

# **ATLAS DIGITAL DE LAS SUBCUENCAS BIRRÍS Y PÁEZ, CARTAGO, COSTA RICA**

**María Monserrath Aguilar Torres\***

## **RESUMEN**

Las subcuencas de los ríos Páez y Birrís son de vital importancia ya que son tributarias de la cuenca del río Reventazón. Sin embargo, debido a la intensa actividad agrícola desarrollada en la zona, se han presentado problemas en las plantas hidroeléctricas a causa del arrastre de sedimentos. Con la ley N° 8023 se creó el Plan de manejo de la cuenca del Reventazón para, realizar acciones concretas en las subcuencas Birrís y Páez. Para ello en el año 2011 se estableció la Comisión para el Manejo y Recuperación de la Subcuenca del río Birrís-Páez (COBIRRÍS-PÁEZ). Este trabajo tiene el objetivo de generar un atlas digital para las subcuencas de los ríos Birrís y Páez como herramienta en el manejo integral de ambas cuencas. En total se crearon 15 capas geográficas, sin embargo 4 de ellas son las más representativas, ya que se calcularon índices importantes como valores de elevación, tiempo de concentración y caudal máximo para cada una de las microcuencas. Se identificó el sistema de drenajes permanentes de las subcuencas para realizar la delimitación de las microcuencas, en total se ubicaron 70 microcuencas. La capa de uso del suelo representa la cobertura actual para el año 2020, la clasificación realizada presenta una exactitud global de 75%, con 6 clasificaciones. Entre las demás capas realizadas se encuentran temperatura, precipitación, cantones, distritos y suelo. Finalmente se generó una guía de usuario que permite a los interesados del atlas, conocer el procedimiento para el cálculo de caudal máximo.

Palabras clave: Manejo de cuencas, SIG, Caudal máximo, Información geográfica, Microcuenca.

## ABSTRACT

The sub-catchments of the Páez and Birrís rivers are of vital importance as tributaries of the Reventazón river subbasins. However, due to the high agricultural activity developed in the area, there have been problems in hydroelectric plants due to the dragging of sediments. With Law 8023, the Reventazón Basin Management Plan was created to carry out concrete actions in the Birrís and Páez subbasins. To do this, the Commission for the Management and Recovery of the Birrís-Páez River watershed (COBIRRÍS-PÁEZ) was created in 2011. This work has the objective of generating a digital atlas for the subbasins of the Birrís and Páez rivers as a tool in the integral management of basins. In total 15 geographic layers were created, however 4 of them are the most representative and important because they provide indices such as elevation values, concentration time and maximum flow for each of the microbasins. In addition, the permanent drainage system of each subbasins was identified to delimit the microbasins, in total 70 microbasins were identified. The land use layer represents the current coverage for the year 2020, the classification carried out presents a global accuracy of 75%, with 6 land cover classes. Among other generated layers are: temperature, precipitation, counties, country districts and soil. Finally, a user guide was generated that allows atlas users to know the procedure for calculating maximum Flow.

Keywords: Watershed management, GIS, Maximum flow, Geographic information, Microbasin.

\*Aguilar, M. 2021. Atlas digital de las subcuencas Birrís y Páez, Cartago, Costa Rica. Tesis de Licenciatura. Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.

# ACREDITACIÓN

## CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DEL PROYECTO DE GRADUACIÓN

Trabajo final de graduación defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador, integrado por M.Sc. Dorian Carvajal Vanegas, Máster Vladimir Jiménez Salazar y Ph.D. Julio Calvo Alvarado como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Forestal, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.



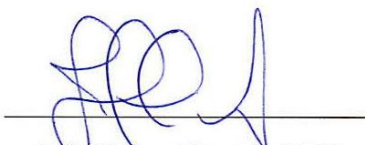
Dorian Carvajal Vanegas M.Sc

Director de tesis y Coordinador de Trabajos Finales de Graduación



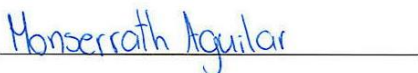
Máster Vladimir Jiménez Salazar

Profesor lector



Julio Calvo Alvarado Ph.D

Profesor Lector



María Monserrath Aguilar Torres

Estudiante

## **DEDICATORIA**

*A mis padres, hermanos y abuela que son un pilar en mi educación y han dado su mayor esfuerzo para poder llegar hasta acá. Son mi mayor apoyo, gracias por estar siempre conmigo.*

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi profesor tutor Dorian Carvajal, por brindarme su incondicional ayuda, por su amistad y confianza. Gracias por aconsejarme y ser parte de este proceso, nada hubiese sido posible sin su ayuda y conocimiento.

Al director Alejandro Meza y la Escuela de Ingeniería Forestal por el apoyo económico en el transporte para realizar las giras.

A todos los miembros de la COBIRRÍZ-PÁEZ por la confianza y permitirme realizar mi trabajo final de graduación.

A mis amigas y compañeras Mauren y Adriana por el apoyo y amistad durante estos años de estudio.

A José Adán por todo el apoyo durante todo este proceso.

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN .....	i
ABSTRACT.....	ii
ACREDITACIÓN .....	iii
DEDICATORIA .....	iv
AGRADECIMIENTOS .....	v
ÍNDICE GENERAL .....	vi
ÍNDICE DE CUADROS .....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS .....	ix
ÍNDICE DE ANEXOS .....	x
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS .....	3
2.1. Objetivo general .....	3
2.2. Objetivos específicos .....	3
3. REVISIÓN DE LITERATURA .....	4
3.1. Ciclo hidrológico.....	4
3.2. Componente hídrico .....	5
3.3. Cuenca hidrográfica .....	5
3.4. Morfología de cuencas hidrográficas .....	6
3.4.1. Área y perímetro de la cuenca .....	6
3.4.2. Pendiente de la cuenca.....	6
3.4.3. Elevación .....	7
3.4.4. Tiempo de concentración.....	7
3.4.5. Caudal máximo .....	7



3.4.6.	Red de drenaje .....	7
3.5.	Manejo de cuencas .....	8
3.6.	Sistemas de información geográfica .....	10
3.6.1.	Atlas digitales .....	10
4.	MATERIALES Y MÉTODOS .....	13
4.1.	Área de estudio.....	13
4.1.1.	Subcuenca Birrís .....	13
4.1.2.	Subcuenca Páez.....	14
4.2.	Identificación de capas .....	14
4.3.	Generación de nuevas capas.....	15
4.3.1.	Red de hídrica .....	16
4.3.2.	Subcuencas y microcuencas.....	17
4.3.3.	Uso de la tierra.....	20
4.3.4.	Temperatura y precipitación .....	23
4.4.	Corrección de capas disponibles .....	24
4.5.	Elaboración de guía de usuario .....	25
4.5.1.	Sistema de estandarización de carpetas .....	25
4.5.2.	Acceso a la información .....	26
5.	RESULTADOS .....	27
5.1.	Identificación de capas.....	27
5.2.	Generación de nuevas capas.....	28
5.2.1.	Red hídrica.....	28
5.2.2.	Subcuencas y microcuencas.....	29
5.2.3.	Uso del suelo.....	32

5.2.4.	Temperatura y precipitación .....	36
5.3.	Elaboración de guía de usuario .....	38
5.4.	Estandarización de carpetas .....	39
5.5.	Acceso a la información.....	39
6.	CONCLUSIONES.....	41
7.	RECOMENDACIONES.....	42
8.	REFERENCIAS.....	43
9.	ANEXOS .....	55

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Valores de coeficiente de escorrentía (C) en relación con la clasificación hidrológica de suelos del SCS y pendiente del terreno. ....	20
<b>Cuadro 2.</b> Rangos de clasificación para el estadístico Kappa (K).....	23
<b>Cuadro 3.</b> Lista de capas elaboradas para el Atlas Digital de las subcuencas Birrís y Páez. ..	27
<b>Cuadro 4.</b> Distribución áreas de los usos del suelo presentes en las subcuencas Birrís y Páez. ....	32
<b>Cuadro 5.</b> Matriz de confusión para evaluar la exactitud de la clasificación de uso del suelo de las subcuencas Birrís y Páez. ....	36

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Representación del ciclo hidrológico. ....	4
<b>Figura 2.</b> Ubicación geográfica de las subcuencas Birrís y Páez. ....	13
<b>Figura 3.</b> Grado de bifurcación dentro de una cuenca según el Orden de Strahler. ....	17
<b>Figura 4.</b> Reducción de resolución espacial de capas de temperatura y precipitación a partir de centroides con información.....	24
<b>Figura 5.</b> Muestra de sistema de estandarización de la base de datos del Atlas digital de las subcuencas Birrís y Páez.....	26
<b>Figura 6.</b> Red hídrica de las subcuencas Birrís y Páez .....	29
<b>Figura 7.</b> Delimitación de las subcuencas Birrís y Páez.....	30
<b>Figura 8.</b> Delimitación de las microcuencas ubicadas en las subcuencas Birrís y Páez.....	31
<b>Figura 9.</b> Coberturas de uso del suelo de las subcuencas Birrís y Páez.....	34
<b>Figura 10.</b> Distribución de precipitación mensual en las subcuencas Birrís y Páez.....	37
<b>Figura 11.</b> Distribución de temperatura mensual en las subcuencas Birrís y Páez.....	38
<b>Figura 12.</b> Organización de la base de datos del Atlas Digital de las subcuencas Birrís y Páez. ....	39

## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>Anexo 1.</b> Glosario de siglas y abreviaciones de las tablas de atributos.....	55
<b>Anexo 2.</b> Tutorial para la delimitación de cuencas con QSWAT+1.2.2. ....	57
<b>Anexo 3.</b> Procedimiento para realizar la clasificación supervisada en R. ....	65
<b>Anexo 4.</b> Tutorial de descarga de una imagen Landsat. ....	68
<b>Anexo 5.</b> Guía de usuario para el cálculo de caudal máximo.....	72
<b>Anexo 6.</b> Secciones de metadatos de las capas desarrolladas para el Atlas Digital. ....	78

# 1. INTRODUCCIÓN

Desde los años 50 en Costa Rica se ha incrementado la producción agrícola y ganadera, lo cual se demuestra en un importante desarrollo económico en áreas rurales, a partir del abastecimiento de mercados locales e internacionales con los productos agrícolas de la zona (Sáenz, 2013). Sin embargo, estas actividades han alterado procesos biológicos, físicos y químicos en los ecosistemas, afectando la cantidad y la calidad del agua (Oliveira, Dutra y Ceruti, 2012; Araya y Calvo, 2017; Ballesteros y López, 2017), por medio de la contaminación con agroquímicos, materia orgánica y el arrastre de sedimentos (Gómez-Calderón, Solórzano-Quintana, y Villagra-Mendoza, 2017). De este modo, se ha atribuido a la producción agrícola como una de las actividades que genera la mayor erosión del suelo (FAO y ITPS, 2015).

En este contexto, toma relevancia el manejo del recurso hídrico, para lo que se ha identificado a las cuencas hidrográficas como unidades de planificación y manejo de recursos naturales. Lo anterior con la intención de generar una armonía entre la permanencia de los recursos naturales y el desarrollo de las actividades productivas del ser humano (Jiménez y Benegas, 2019). El manejo adecuado de una cuenca genera beneficios tanto para el ambiente como para la comunidad en la que se encuentra inmersa. Por ejemplo, la conservación de las propiedades del suelo, la garantía en la calidad y suministro de agua y el desarrollo de actividades productivas (Zumbado y Mesén, 2018). Por tanto, es importante realizar un análisis de las interacciones físico-biológicas y socioambientales relacionadas con el agua, principalmente en cuencas de montaña, debido a la dinámica natural del flujo de agua de la parte alta de la cuenca hacia otros puntos de ella (Jiménez y Benegas, 2019).

La zona norte de Cartago es un sector que presenta condiciones adecuadas para la producción hortícola. En ella se localiza la principal zona productora de papa y hortalizas en el país, donde se cultiva alrededor de 2800 hectáreas, con un rendimiento de 25 ton/ha (MAG, 2016). Otro de los usos de la tierra que destaca en esta zona, son los pastos para producción de leche (PREVDA, 2008). Paralelamente, la subcuenca del río Birrís es de interés para la Junta Administrativa del Servicio Eléctrico Municipal de Cartago (JASEC) y el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), quienes aprovechan el recurso hídrico para la generación de electricidad mediante el

proyecto hidroeléctrico Birrís, Angostura y Reventazón. No obstante, se produce un 16% del total de sedimento de la cuenca del Reventazón (JASEC, 2016; Otárola, 2007).

En la ley de N° 8023 se creó el Plan de manejo de la cuenca del Reventazón, establece la Comisión para el Ordenamiento y Manejo de la Cuenca del Río Reventazón (COMCURE). Esta comisión se convierte en la instancia coordinadora entre las entidades involucradas en el manejo integrado de la cuenca. A su vez, desde el año 2010 la Comisión para el Manejo y Recuperación de la Subcuenca del río Birrís -Páez (COBIRRÍS-PÁEZ). trabaja en acciones concretas para fortalecer el desarrollo y recuperación de las subcuencas. Esto, dada la importancia económica y la necesidad de mantener un abastecimiento de agua adecuado para las comunidades que se encuentran dentro de ellas (D. Carvajal, comunicación personal, 10 de junio de 2020) y de reducir los altos niveles de contaminación y erosión de la subcuenca del río Birrís (Vargas, 2010; Guzmán, Watson y Villagra, 2019).

La investigación en temas relacionados a la gestión del agua y afines no muestra de una forma adecuada la información necesaria para la elaboración de los planes de manejo de las cuencas hidrográficas (Cervantes, 2008). La mayoría de los estudios se han desarrollado a partir de la demanda y la necesidad de información (Guzmán, et al., 2019; Vargas, 2010) y desde el año 2000 se han realizado en temas concretos como los servicios ecosistémicos, cambio climático, erosión, entre otros (Jiménez y Benegas, 2019). Por este motivo, es importante generar y sistematizar información que posteriormente facilite la toma de decisiones, como herramientas e insumos necesarios para lograr un manejo adecuado (Benegas y Faustino 2008).

Dentro de este marco, la recopilación de información geográfica en un Atlas digital permitirá tener acceso a recursos digitales para las subcuencas Birrís-Páez y podría convertirse en un importante insumo para futuras investigaciones. El presente estudio tiene como objetivo generar un Atlas digital para las subcuencas de los ríos Birrís y Páez como una herramienta en el manejo integral de cuencas en la provincia de Cartago.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo general**

Generar un atlas digital para las subcuencas de los ríos Birrís y Páez como herramienta en el manejo integral de cuencas.

### **2.2. Objetivos específicos**

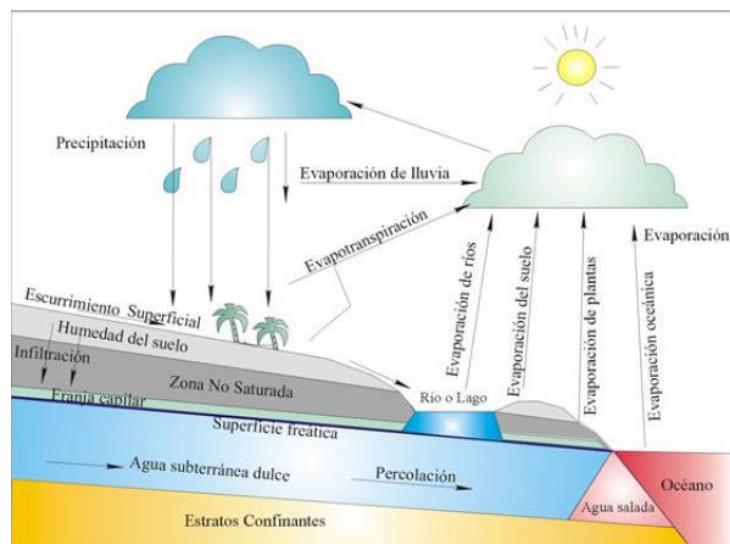
- Identificar las capas de información geográfica para la conformación del Atlas digital de las subcuencas Birrís y Páez.
- Desarrollar las capas de información geográfica identificadas de las subcuencas Birrís y Páez.
- Elaborar guía de usuario sobre la creación y uso de las capas geográficas de las subcuencas Birrís y Páez.

### 3. REVISIÓN DE LITERATURA

#### 3.1. Ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico se refiere a los cambios que experimenta el agua en sus distintos estados y formas; la descripción de este puede iniciar en cualquier punto, no tiene principio ni fin (Villón, 2004). Es un proceso dinámico, donde el agua es impulsada por la energía térmica del sol o del interior de la tierra y fuerza de gravedad (Díaz, Esteller, y López, 2005).

Los cuerpos de agua se evaporan por acción de la temperatura, este vapor asciende a la atmósfera y por medio de diferentes mecanismos de enfriamiento se condensa y forma nubes que posteriormente precipitan (Villón, 2004). El agua llega a la tierra y cuerpos de agua por medio de la precipitación (Carvajal-Vanegas y Calvo-Alvarado, 2012). Una parte de la precipitación se evapora antes de llegar al suelo y regresa a la atmósfera, lo mismo sucede con el agua que es interceptada por la vegetación. Por otra parte, la precipitación que llega a la superficie puede tomar varias vías, regresa a la atmósfera por medio de evaporación, puede quedar retenida en el suelo por infiltración, convertirse en agua subterránea o puede escurrir superficialmente y recargar los mantos acuíferos (Maderey y Jiménez, 2005; Chang, 2012; Schulz y García, 2015) (Figura 1).



**Figura 1.** Representación del ciclo hidrológico.

Fuente: Schulz y García (2015).



### **3.2. Componente hídrico**

El suministro de agua es un recurso vital para la vida y desarrollo del ser humano. Desde el punto de vista social, ambiental y económico, se requiere del agua para satisfacer las necesidades básicas y secundarias (Maderey, 2005). El recurso hídrico se define como un recurso disponible tanto en calidad como en cantidad en un lugar y tiempo determinado (OMM, 2012). Dicha disponibilidad permite el establecimiento de actividades productivas, desarrollo de agricultura, generación hidroeléctrica, uso como medio de transporte y pesca, entre otros (Arroyave, Builes, y Rodríguez, 2012).

### **3.3. Cuenca hidrográfica**

Una cuenca hidrográfica es toda aquella superficie de tierra que, por su condición topográfica alberga todas las aguas de escorrentía en un mismo punto, formando un cauce principal (Chang, 2012; Aguirre, 2011). Las cuencas están conformadas por una variedad de componentes físicos, biológicos y sociales, que se encuentran interconectados entre sí (Jiménez, 2006; Cotler, 2011) y funcionan como un sistema ambiental con entradas y salidas de recursos (agua) (Silva, Santos, Leal, 2016). Además, representa un área que está en función a un cauce y a lo largo de este se desarrollan actividades sociales y productivas que requieren del recurso hídrico. Por tanto, son consideradas como una unidad adecuada de análisis (Zaldívar, 2017; Parra y Montealegre, 2019).

Las cuencas hidrográficas son una opción conveniente para la planificación territorial, ya que funciona como un sistema, las actividades que se desarrollan en la parte alta de la cuenca impactan en la parte media y baja (Estado del ambiente, 2017). De este modo, permiten comprender y organizar la relación entre la sociedad y la naturaleza en espacios geográficos específicos. Lo que ha propiciado el uso de esta unidad para la planificación estratégica, manejo y aprovechamiento del recurso hídrico (Burgos, Bocco y Sosa, 2015).

Una cuenca hidrográfica se encuentra estructurada de una forma jerárquica, se divide en subcuencas y microcuencas, que de igual manera son delimitadas por una línea divisoria de aguas. Las subcuencas son de menor tamaño en relación con la cuenca y sus aguas convergen

en el cauce principal de la cuenca y estas a su vez están divididas en microcuencas, las cuales drenan a un afluente o río secundario (Cotler, Galindo, González, Pineda, y Ríos, 2013; World Vision, 2004).

### **3.4. Morfología de cuencas hidrográficas**

La morfometría de las cuencas hidrográficas realiza una descripción física espacial, esta resulta de gran utilidad ya que permite interpretar la funcionalidad hídrica para la definición de estrategias de manejo y realizar comparaciones entre cuencas, a partir de la descripción precisa de la geometría. La morfometría es única para cada cuenca y está definida por parámetros de forma, relieve y relacionados a la red hídrica, estos influyen en la dinámica fluvial superficial como caudales, transporte de sedimentos y nutrientes a lo largo de la cuenca (Gaspari, 2012; Senisterra, Rodríguez, Gaspari, y Mazzucchelli, 2014; Aumassane, et al., 2018).

#### **3.4.1. Área y perímetro de la cuenca**

El área de la cuenca se refiere a la superficie de drenaje proyectada en un plano horizontal, delimitada por la divisoria de aguas. El perímetro es la dimensión de la línea divisoria de aguas que limita una cuenca, representado en un plano horizontal (Villón, 2004).

El área es un factor que ayuda a describir el comportamiento de escurrimiento en una cuenca, para cuencas de menor área se espera que el tiempo de concentración sea bajo, así como una mayor susceptibilidad para alcanzar caudales pico en menos tiempo (Esper y Perucca, 2014).

#### **3.4.2. Pendiente de la cuenca**

La pendiente de la cuenca es uno de los parámetros utilizados para caracterizar el relieve, se encuentra relacionado con la infiltración y escorrentía superficial y subterránea del agua (Villón, 2004), además tiene influencia directa en el tipo y diseño de los cauces y en el potencial erosivo. Las cuencas de mayor pendiente tienden a responder con mayor celeridad ante las precipitaciones, generando caudales pico en menos tiempo (Camino, et al., 2018).

### 3.4.3. Elevación

La elevación muestra la distribución espacial del escurrimiento, se considera como un parámetro representativo ya que está relacionado con variables como temperatura y precipitación. La variación altitudinal de una cuenca incide directamente en la distribución térmica y por lo tanto en la existencia de microclimas y hábitats característicos, de acuerdo con las condiciones locales (Gámez, 2010; Peña, 2018).

### 3.4.4. Tiempo de concentración

Es el tiempo que tarda una gota de lluvia en escurrir superficialmente, desde el lugar más lejano de la cuenca hasta el punto de salida, a partir de este momento, ocurre la máxima concentración de agua en el cauce (Villón, 2004; Peña, 2018). Existen distintos factores que afectan el tiempo de concentración, cuencas con pendientes altas provocan una alta velocidad y concentración del agua en los drenajes (Gil, Volonté y Campo, 2019). Entre mayor densidad de drenaje, más rápida será la respuesta de la cuenca, evacuando el agua en menos tiempo (Gaspari, Rodríguez, Senisterra, Delgado y Besteiro, 2013).

### 3.4.5. Caudal máximo

Martín (2003), menciona que el caudal máximo se refiere a la cantidad de agua que fluye después de que un río experimenta un fenómeno de crecida o avenida de carácter extraordinario, mostrando efectos secundarios como inundaciones y erosión. Según la magnitud, puede implicar cambios en el cauce del río. Es un valor que depende en gran medida de factores como, la intensidad de lluvia, así como el tiempo de duración. Además, está relacionado a características de la cuenca como el tipo de suelo, cobertura y área de la cuenca; estas variables determinan el gasto bajo la lluvia máxima (Villón, 2004; Algeciras y Bermúdez, 2016).

### 3.4.6. Red de drenaje

La red de drenaje es la trayectoria que siguen los cauces por donde corre el agua de manera superficial dentro de la cuenca. Consiste en un cauce principal y un sistema de afluentes tributarios. En estos se representa la eficiencia del sistema de drenaje, donde se ven involucrados

otros factores como el suelo, rocas, grado de fracturación, topografía y cobertura de la cuenca (Villón, 2004; Gámez, 2010).

#### *Densidad de drenaje*

Este índice relaciona la longitud de la red hídrica y el área de la cuenca sobre la cual se drenan las corrientes. Es un parámetro físico que refleja la dinámica de la red hidrográfica, ayuda a determinar si esta se encuentra bien o mal drenada (Villón, 2004; Díaz, et al., 2005). Cuencas bien drenadas (altos valores de densidad de drenaje) tienen mayores posibilidades de ocurrencia de eventos de crecidas (Dugarte, Ferrer y Delgadillo, 2015).

#### *Orden de cauces*

Es una clasificación que proporciona el grado de bifurcación dentro de una cuenca. El orden del río principal representa el grado de bifurcación de esta (Gámez, 2010). Existen distintos métodos para generar el grado de bifurcación, en el caso del orden de Strahler considera corrientes de primer orden aquellas donde nace el drenaje y su única fuente de agua es la precipitación, de modo general propone que cuando dos corrientes de orden “i” se unen, el grado de la siguiente corresponde a  $i+1$  (Strahler, 1952).

#### *Pendiente del cauce*

La pendiente del cauce principal es un factor que explica el desnivel que tiene el drenaje (Villón, 2004), es uno de los factores que controla la velocidad del agua (Elosegi y Sabater, 2009). Se encuentra directamente relacionado con el escurrimiento del cauce, por lo que su conocimiento es importante para la evaluación de problemáticas asociadas a la erosión e inundaciones que pueden suceder después de un evento (García, 2018).

### **3.5. Manejo de cuencas**

El manejo de cuencas abarca un conjunto de acciones que están en función del adecuado desarrollo y aprovechamiento de recursos naturales dentro de una cuenca hidrográfica, para mejorar la calidad de vida de la población (Jiménez y Benegas, 2019). Es así como toma

importancia considerar el uso actual y potencial del suelo, así como las actividades e intereses de las comunidades y sectores que se encuentra inmersos en ella (World Vision, 2004).

El manejo de cuencas se considera necesario cuando el agua representa un bien socioambiental y fundamental para el desarrollo de la comunidad y esta depende de su disponibilidad y calidad (Braz; Mirandola, Pinto, Salinas y Oliveira, 2020). De tal modo, se considera indispensable tomar en cuenta que se debe hacer un uso y manejo sostenible de recursos naturales (Jiménez, Benegas, 2019). El manejo es una de las formas de promover la interacción sostenible de las actividades económicas y la naturaleza, lo que permite realizar una adecuada gestión del recurso hídrico (Braz, et al., 2020).

Se habla de Manejo Integral de Cuencas al hacer referencia a una serie de procesos que promueven el desarrollo y administración en conjunto del agua, tierra y recursos relacionados. De forma que se genere un equilibrio entre el aprovechamiento de recursos y la protección de ecosistemas (Martínez y Villalejo, 2018). Por lo tanto, es importante tomar en cuenta a las personas e instituciones que viven e interactúan con la cuenca, estos son los principales actores en el manejo y determinación del uso de los recursos, así como la identificación de la problemática y aspectos clave para el manejo (Burgos, et al., 2015).

Costa Rica cuenta con 34 cuencas hidrográficas que drenan sus aguas a través de tres vertientes, corredor biológico del río San Juan, en el mar Caribe y en el océano Pacífico (Rojas, 2011; Jankilevich, Aravena, y Von Breymann, 2019). Una de las cuencas de mayor importancia es la del río Reventazón, ya que es la mayor generadora de energía hidroeléctrica. Aporta el 85% de la producción hortícola y gran parte de la producción de leche y carne. Además, sus aguas abastecen el 25% del caudal que provee servicios de agua potable a casi un millón de habitantes de la Gran Área Metropolitana (GAM) (Ballesteros y López, 2017). Dada su importancia, esta cuenta con legislación propia para su manejo y conservación (Rojas, 2011). La Ley N°8023 establece la Comisión para el Ordenamiento y Manejo de la Cuenca del Río Reventazón (COMCURE), como un órgano desconcentrado del MINAE con capacidades para la administración de recursos en el manejo de la cuenca del Reventazón.

El manejo a nivel de subcuencas y microcuencas puede traer ventajas en la gestión efectiva de los recursos. Al tener un área más pequeña los intereses de los involucrados tienden a ser más homogéneos, por lo que se requiere de menor inversión de recursos y se facilita la participación y coordinación de los actores (World Visión, 2004). Por este motivo, ha surgido la participación de la Comisión para el Manejo y Rescate de la Subcuenca del Río Birrís y Páez (COBIRRÍS-PÁEZ). Esta surgió con el fin de gestionar la cuenca del río Birrís en el año 2010 y para el año 2011 amplió su extensión a la subcuenca del río Páez (Artavia, 2017).

### **3.6. Sistemas de información geográfica**

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son un conjunto de hardware y software integrados que ayudan a introducir, almacenar y presentar datos geográficos. Estos representan una serie de capas de información espacial digital, útiles para el análisis del territorio (Kapetsky y Meaden, 1992; Llopis, 2008; Buzai y Ruíz, 2012). Además, permiten realizar simulaciones con situaciones específicas que no podrían llevarse a cabo en la vida real (Barraza, Rocha, Monjardin, Adrian, y González, 2017).

Desde su creación, ha sido una herramienta ampliamente utilizada para el análisis de datos espaciales. Los problemas que han sido abordados a partir del uso de SIG abarcan gran variedad de campos, desde el ordenamiento territorial y la gestión del riesgo, hasta el monitoreo de variables ambientales, así como cambios en el suelo y las coberturas (Medina, 2017). Así mismo, se ha empleado herramientas de SIG para la identificación y delimitación de cuencas hidrográficas con el uso de modelos de elevación digital (MED). Además, para la extracción de parámetros morfométricos empleados en modelos hidrológicos (Rodríguez, Gaspari, Sinisterra, Delgado y Besteiro, 2012; Esper y Fernández, 2017) y la caracterización de cuencas y gestión del recurso hídrico (Medina, 2017).

#### **3.6.1. Atlas digitales**

Los atlas son herramientas que permiten la visualización de mapas con el fin de presentar información temática y geográfica de un determinado territorio a partir de la cartografía (Pérez, 2014). Inicialmente se diseñaron como un insumo educativo y como herramientas clave de

gestión, posteriormente han sido útiles en la toma de decisiones para el desarrollo territorial, gracias a la digitalización de información (Claret, Gómez y Sánchez, 2018).

La información disponible en un atlas y generada a partir de SIG, permite visualizar y presentar datos base para el manejo integrado de cuencas (Guevara, Olgín, Mancilla, y Barreto, 2019). Al digitalizar la información, es posible realizar un análisis más detallado de las condiciones de los recursos naturales e hídricos (André, Nascimento, y Silva, 2010). Cotler (2011), menciona que además de generar información sobre la caracterización del territorio, los atlas digitales muestran resultados que evidencian la necesidad de accionar y de investigar.

Diversos estudios han desarrollado atlas digitales con información abarcando datos climatológicos, como temperatura y precipitación (Fernández, Zavala, y Romero, 2010; Cravero, Bianchi, Elena, Bianchi, 2017; Andrade, 2018), mostrando dinámicas del suelo como erosión (Rojas, Obando y Casimiro, 2017) y actualizaciones de la red hídrica (Giraut, Lupano, Soldano, y Rey, 2007). Además, características de relieve, límites administrativos, clima y vegetación (Moreira, Silva y Silva, 2010), aspectos que son necesarios para la elaboración de planes de manejo.

En Costa Rica se desarrolló un atlas en el año 2011, con el fin de caracterizar el ámbito territorial de cada una de las cuencas hidrográficas en relación con la geografía, geología, hidrogeología, suelos, zonas de vida, climatología, entre otros (Rojas, 2011). Por su parte, el SENARA (2005) desarrolló mapas hidrogeológicos que permiten visualizar topografía, geografía y características hidrogeológicas. Sin embargo, esta información se muestra como documentos de consulta, por lo que es importante realizar estudios locales. En caso de las subcuencas Birrís y Páez se han desarrollado investigaciones en torno a la hidrología. Jiménez (2018), determinó características hidrogeológicas, donde se muestran las unidades geológicas, geomórficas y perfiles hidrogeológicos de la subcuenca Páez. Ramírez (2006), desarrolló un modelo hidrogeológico y Vargas (2010), generó mapas de erosión y sedimentación para la cuenca Birrís.

Aunado a ello, es posible obtener información geográfica desde geoportales o puede ser generada a partir de mediciones directas. Los geoportales han complementado a los SIG como

un componente clave para la resolución de problemas, estos son plataformas que representan la mejor aplicación para referir la digitalización de datos de una forma espacial (Sigala, 2009).

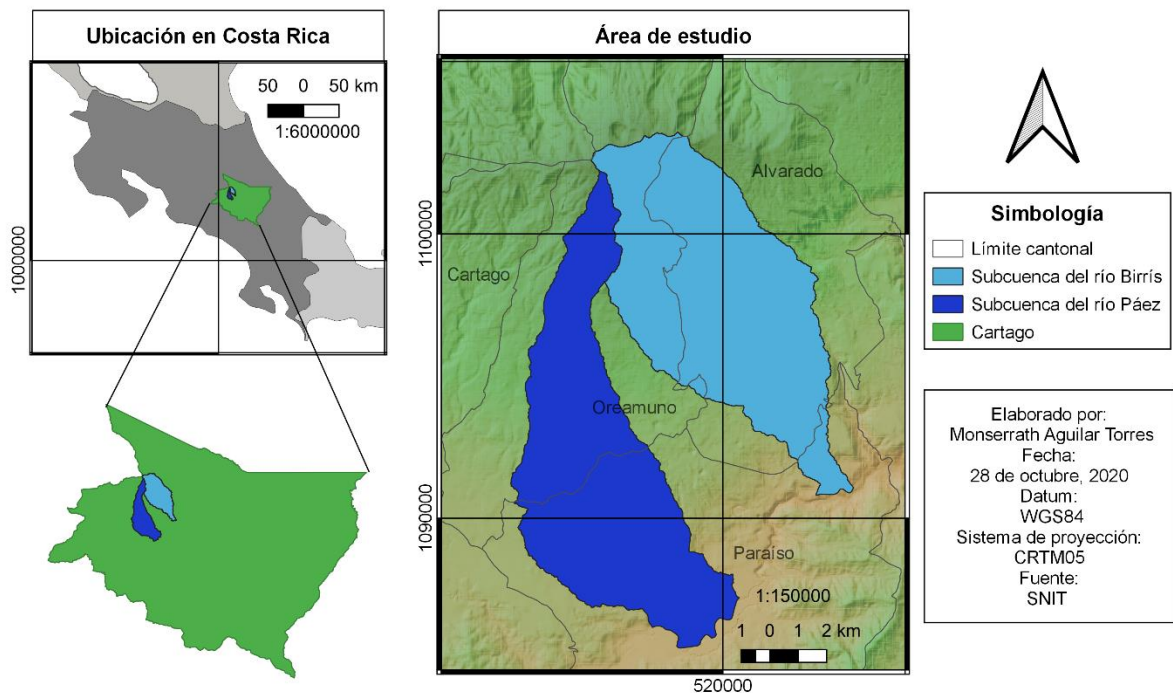
En Costa Rica existen instituciones con geoportales de acceso público como el Ministerio de Obras Públicas y Transporte (MOPT), Dirección de Aguas, el Centro de Investigaciones Agrónomas (CIA), Fundación MarViva y algunas municipalidades han integrado dentro de su gestión, el uso de información geográfica para el ordenamiento territorial. Por otra parte, el Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT) permite el intercambio de información territorial entre todas las instituciones que lo requieran. A través de este sistema, es posible obtener información de relieve, transporte, recurso hídrico, límites administrativos y ambiente (Registro Nacional, 2016).



## 4. MATERIALES Y MÉTODOS

### 4.1. Área de estudio

El estudio se realizó en las subcuencas de los ríos Birrís y Páez, ubicadas en la vertiente sureste del Volcán Irazú, provincia de Cartago, en los cantones de Alvarado, Oreamuno y Paraíso (Figura 2). Las subcuencas Birrís y Páez se ubican entre las coordenadas CRTM05 (515366-524437) y (1102846-1091030) y CRTM05 (515722-519870) y (1102167-10870750) respectivamente. Abarcando una parte de los cantones de Alvarado, Oreamuno y Paraíso.



**Figura 2.** Ubicación geográfica de las subcuencas Birrís y Páez.

#### 4.1.1. Subcuenca Birrís

La subcuenca tiene una superficie de 58 km<sup>2</sup>, se localiza en un rango altitudinal desde los 3443 msnm en la cumbre del Volcán Irazú, hasta los 825 msnm en la planta hidroeléctrica Birrís III. Presenta una precipitación media anual de 2500 mm y temperatura promedio anual de 20°C. Según la clasificación de zonas de vida de Holdridge (Holdridge, 1967), la subcuenca se localiza en las zonas de vida bosque pluvial montano (bp-M), bosque húmedo montano bajo (bh-MB),

bosque muy húmedo montano bajo (bmh-MB), bosque húmedo premontano (bh-P) y bosque muy húmedo premontano (bmh-P). De acuerdo con la clasificación taxonómica USDA (Soil Survey Staff, 2007) presenta suelos de orden inceptisoles, derivados principalmente de materiales volcánicos. El cauce del río Birrís es alimentado por diversos afluentes como la quebrada Pacayas, quebrada Presidio y quebrada Laguna. La subcuenca se encuentra inmersa en una matriz heterogénea de usos del suelo, donde predominan actividades agrícolas y pastoreo (Ramírez y Arias, 2011). Así mismo, presenta una importancia económica, ya que es tributaria para las plantas hidroeléctricas operadas por el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) y la Junta Administrativa de Servicios Eléctricos de Cartago (JASEC), produciendo cerca de un 60% de la papa de Costa Rica y con una alta producción ganadera (Lianes, Marchamalo, y Roldán, 2009; Brenes, 2018).

#### 4.1.2. Subcuenca Páez

La subcuenca tiene una superficie de 55 km<sup>2</sup>, se ubica en un rango altitudinal entre los 3330 msnm en la cumbre del Volcán Irazú hasta los 1003 msnm en el embalse de Cachí. Presenta una precipitación media anual de 2200 mm y temperatura promedio anual de 20°C. Según la clasificación de zonas de vida de Holdridge (Holdridge, 1967), la subcuenca se localiza en la zona de vida bosque muy húmedo montano (bmh-M), bosque húmedo montano (bh-M) y bosque húmedo premontano (bh-P). De acuerdo con la clasificación taxonómica USDA (Soil Survey Staff, 2007), presenta suelos de los órdenes ultisoles e inceptisoles, este último en mayor proporción derivado principalmente de materiales volcánicos. Entre los cursos hidrológicos que alimentan al río Páez, se encuentran la quebrada Pollo y Cañada. La subcuenca está inmersa en una matriz con diversos usos del suelo, donde predominan los cultivos de hortalizas en la parte alta y en la parte media y baja destaca la producción de café y el aprovechamiento del recurso hídrico (Ledezma, 2009; Tencio, 2013).

## 4.2. Identificación de capas

Para la elaboración de capas requeridas en ambas subcuencas, se verificó la información disponible y necesaria para desarrollar un Atlas Digital con un enfoque hidrológico y de cuencas hidrográficas. Para ello, se consultó planes de manejo de cuencas, geoportales, investigaciones

en el tema, además se asistió a reuniones con miembros de la Comisión para el Manejo y Recuperación de la Subcuenca del río Birrís-Páez (COBIRRÍS-PÁEZ). La información se recopiló y se le asignó una categoría de “Disponible” o “No Disponible”. El criterio que se empleó para dicha clasificación dependió del tipo de información con la que se contaba. La información que solamente requería de actualización para los límites de las subcuencas se clasificó como “Disponible”. Caso contrario la información que requería de una actualización de información o que estas se generaran de nuevo, se clasificó como “No Disponible”.

#### **4.3. Generación de nuevas capas**

Las capas que se elaboraron son aquellas clasificadas como “No disponible”, para esto, se utilizaron métodos como fotointerpretación, geoprocésamiento de capas, clasificación no supervisada, verificación de información con puntos de GPS, recorridos del sitio, además del uso de información disponible en geoportales. Todas las capas generadas se recopilaron tomando en cuenta las recomendaciones de estandarización mostradas por Fernández-Mora (2018) y Montenegro-Hernández (2018). Este proceso se realizó por medio del programa QGIS 3.10, el programa R 4.0.3 y con un GPS Garmin 64s para realizar la verificación de datos de campo.

Dentro de las capas que se clasificaron como “No disponible”, existen algunas de las cuales se conoce que son ampliamente utilizadas en planes de manejo. En este caso, es importante generar datos adicionales que hacen referencia a la información que se muestra en las capas, como algunas variables morfométricas a nivel de cauces y microcuencas. Esta información se considera un aporte importante para el Atlas digital y un insumo relevante para las investigaciones que se realicen en las subcuencas Birrís y Páez. La información se recopiló en la tabla de atributos de las capas, los nombres de las columnas se escribieron con una abreviación del nombre en mayúscula y seguido de las unidades en minúscula. La información de los elementos se escribió con tildes y espacio entre las palabras, en caso de los datos representados por números, se utilizaron siempre tres decimales.

#### 4.3.1. Red de hídrica

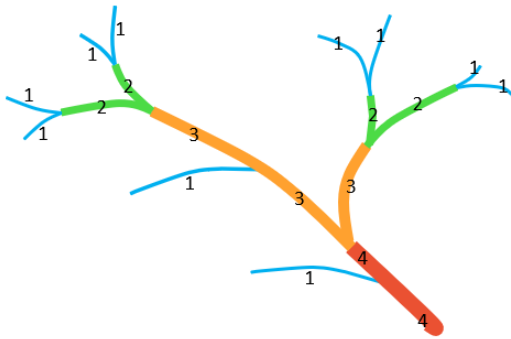
La capa de red hídrica actual se rectificó a partir de las de las capas IGN Cartografía 1:25mil disponible en el SNIT (Salazar, 2016) y ríos 1:50mil del Atlas Digital de Costa Rica (Soto, 2007). Para ello, se realizó una verificación con imágenes satelitales de la trayectoria que siguen los drenajes, desde el punto donde nace cada uno de los ríos de la subcuenca, hasta su desembocadura. Este proceso se realizó para cada una de las subcuencas, además se identificaron todos los drenajes con su respectivo nombre en la tabla de atributos. Para los drenajes que no se disponía de su nombre en las capas antes mencionadas, se realizaron visitas a la zona para identificar el nombre con el que es conocido en la comunidad. Dentro de la tabla de atributos, también se indicaron las siguientes variables:

##### *Longitud*

Para esta variable se determinó el largo (km) de cada uno de los drenajes por medio del programa QGIS 3.10 y cada uno de estos valores se recopiló en la tabla de atributos, según el cauce correspondiente.

##### *Orden de Strahler*

A cada uno de los drenajes se le asignó un grado de bifurcación según el orden de Strahler (1952), este es una forma numérica usada para determinar la complejidad de ramificación de la red hídrica. Los valores se determinaron de una forma manual y se agregaron en la tabla de atributos de la capa de red hídrica, para cada uno de los cauces. Este método consistió en asignar a cada cauce inicial un valor de uno y al drenaje donde convergen dos drenajes del mismo grado, se asignó el valor consecutivo, en este caso dos. Los valores se asignaron de esta forma hasta completar la totalidad de la red hídrica. Para el caso donde se unen dos cauces con distinto valor, se utilizó el de mayor grado. Finalmente, el último número que se colocó corresponde al orden hidráulico (Figura 3).



**Figura 3.** Grado de bifurcación dentro de una cuenca según el Orden de Strahler.

#### *Pendiente del cauce*

Se generó una capa con los valores de pendiente en porcentaje para el área donde se localizan cada uno de los cauces, a partir de esta capa se determinó la pendiente media de cada uno de los drenajes utilizando la herramienta “Slope” de QGIS 3.10.

#### 4.3.2. Subcuencas y microcuencas

Para la delimitación de las subcuencas fue necesario tener tres insumos:

- 1) Un Modelo de Elevación Digital (MED) del área de estudio. En este caso se descargó del portal Alaska Satellite Facility producto de la misión ALOS. La resolución espacial fue de 12,5 m (ASF, 2016).
- 2) La red hídrica de la subcuenca, se utilizó la red hídrica generada en este trabajo.
- 3) El punto de salida del cauce principal de cada subcuenca.

Primero se realizó la corrección de errores del MED, para eliminar depresiones y picos que este presenta, mediante un “fill” o llenado y se delimitó cada una de las subcuencas con el delimitador automático de QSWAT+ 1.2.2.

Posteriormente se verificó los bordes de las subcuencas con las curvas de nivel de las hojas cartográficas 1:50000 ISTARÚ 3445 IV y TAPANTÍ 3445 III debidamente georeferenciadas. Para cada una de las subcuencas se determinaron las siguientes variables:

### *Área drenada y Perímetro*

Se determinó la superficie que abarca cada subcuenca (km<sup>2</sup>), así como el borde en un plano horizontal (km). Estas variables se calcularon por medio del programa QGIS 3.10 para cada una de las microcuencas, el valor obtenido se agregó en la tabla de atributos.

### *Elevación*

Por medio del MED, se determinó el valor de elevación media para cada una de las subcuencas y microcuencas, además de los valores de elevación mínima y máxima. Estos se agregaron a la tabla de atributos de cada microcuenca.

### *Pendiente*

Se generó una capa con los valores de pendiente en porcentaje para cada una de las microcuencas, a partir de esta se determinará la pendiente media, utilizando la herramienta “Slope” de QGIS 3.10. Los datos generados se recopilaron en las tablas de atributos de la capa de microcuencas.

### *Tiempo de concentración*

Para cada una de las microcuencas se calculó el tiempo de concentración, este se determinó por medio de la fórmula de Kirpich (Kirpich, 1940). Para el cálculo se utilizó el largo del cauce principal de cada microcuenca y se determinó la pendiente de este, utilizando el programa QGIS 3.10. Los datos generados se digitalizaron en la capa de microcuencas. Para este proceso se utilizó la fórmula (1), que se presenta a continuación.

$$t_c = 0,0663 \left( \frac{L}{\sqrt{S_c}} \right)^{0,77} \quad (1)$$

Donde:

T<sub>c</sub>: Tiempo de concentración (h).

L: Longitud del cauce principal en kilómetros (km).

S<sub>c</sub>: Pendiente de la cuenca (%).

### *Caudal máximo*

Para cada una de las microcuencas se determinó el caudal máximo, este se realizó por medio del método racional (2), para este cálculo se utilizaron las siguientes variables:

1. Coeficientes de escorrentía, donde intervienen factores como cobertura, pendiente y tipo de suelo (Cuadro 1).
2. El factor de intensidad se determinó por medio de la ecuación 3, para ello se utilizó los valores de intensidad de lluvia desarrollados por Gunther y Dercksen (1990) de las estaciones meteorológicas cercanas a las subcuencas (Cuadro 2).
3. El área de cada microcuenca.

$$Q = \frac{CIA}{360} \quad (2)$$

Donde:

$Q$ : caudal máximo (m<sup>3</sup>/s)

$C$ : coeficiente de escorrentía

$I$ : intensidad máxima de la lluvia (mm/hr)

$A$ : área de la subcuenca (ha)

$$I = \left( 0,5 + \left( \frac{8,22}{2,6+tc} \right) \right) * I_{15} \quad (3)$$

Donde:

$I$ : Intensidad de lluvia (mm/hr)

$Tc$ : Tiempo de concentración (h)

$I_{15}$ : Intensidad de lluvia de 15 minutos de duración

Los valores de escorrentía se obtuvieron a partir del cuadro desarrollado por McCuen (1998). Para determinar el grupo hidrológico (A, B, C y D) se utilizó el programa NumCur, por medio de datos de textura de suelo de la base de datos desarrollada por Sandoval y Mata (2014). Finalmente se seleccionó el valor de escorrentía según el porcentaje de pendiente media presente

en la microcuenca. Para las microcuencas que presenten más de un uso del suelo, se tomará un promedio ponderado del coeficiente de escorrentía.

**Cuadro 1.** Valores de coeficiente de escorrentía (C) en relación con la clasificación hidrológica de suelos del SCS y pendiente del terreno.

Uso del suelo	A			B			C			D		
	0-2%	2-6%	6%+	0-2%	2-6%	6%+	0-2%	2-6%	6%+	0-2%	2-6%	6%+
<b>Cultivado</b>	0,08	0,13	0,16	0,11	0,15	0,21	0,14	0,19	0,26	0,18	0,23	0,31
<b>Pastos</b>	0,12	0,20	0,30	0,18	0,28	0,37	0,24	0,34	0,44	0,30	0,40	0,50
<b>Bosques</b>	0,05	0,08	0,11	0,08	0,11	0,14	0,10	0,13	0,16	0,12	0,16	0,20
<b>Urbano</b>	0,25	0,28	0,31	0,27	0,30	0,35	0,30	0,33	0,38	0,33	0,36	0,42

Fuente: McCuen (1998)

#### 4.3.3. Uso de la tierra

Se determinó el uso del suelo al año 2020 en ambas subcuencas, por medio de una clasificación supervisada. Esta consiste en el uso de imágenes satelitales para realizar una interpretación del tipo de cobertura que representa. Para ambas subcuencas se definieron seis usos del suelo dominantes en la zona: agrícola, pastos, plantaciones forestales, bosques, uso urbano y cuerpos de agua.

##### *Selección de imagen satelital*

Se utilizó una imagen Landsat 8 del año 2020 con la menor cantidad de nubes y sombras para generar un mejor resultado. La imagen se descargó de la página del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). La resolución espacial fue de 30 metros para las bandas de 1 a 9, excepto para la banda 8 que presentó una resolución de 15 metros y las bandas 10 y 11 tenían una resolución de 100 metros. La fecha de la imagen corresponde al 4 de febrero del 2020.



### *Recolección de datos*

La toma de datos se realizó en rutas preseleccionadas con el fin de cubrir gran parte de las subcuencas. A lo largo de estas se tomaron puntos con el GPS, en cada uno de estos se tomó la información de las coordenadas “X” y “Y” en CRTM05 y el uso del suelo presente de acuerdo con los seis usos del suelo definidos. Cada punto recolectado, contenía la información de uso del suelo hacia la izquierda y a la derecha de la ruta. En total se recolectaron 138 puntos.

Posteriormente, los puntos tomados con un GPS GARMIN 64 se descargaron en la computadora. Con ayuda del programa QGIS 3.10 se creó una capa con áreas de entrenamiento (polígonos) para cada uno de los puntos recolectados, tanto hacia la izquierda como a la derecha de la ruta. Para verificar que el uso del suelo realmente corresponde al asignado en campo, se utilizó la imagen Landsat 8 y las imágenes de Google Satellite y Bing para visualizar las diferentes coberturas. En cada uso del suelo se digitalizó al menos 10 áreas de entrenamiento. Las áreas de entrenamiento se crearon tomando en cuenta solo un 70% de los puntos tomados en campo, el 30% restante se utilizaron para la validación de la clasificación.

### *Procedimiento de clasificación supervisada*

La clasificación supervisada se desarrolló en el programa R, utilizando el paquete RStoolbox. Este paquete presenta herramientas que permiten realizar diferentes procedimientos para el análisis de imágenes satelitales. Para ello se cargaron los metadatos de la imagen Landsat 8 en el entorno de R, se generó la composición a color RGB y se realizó la corrección atmosférica con el fin de eliminar las áreas donde existan interferencias causadas por la atmosfera y la reflectancia generada. Finalmente se cargó el archivo shape con las áreas de entrenamiento y a partir de la herramienta “superClass” se realizó la clasificación.

### *Validación*

La matriz de confusión se desarrolló con 41 puntos recolectados de campo, seleccionados de forma aleatoria (30% de los datos de campo) y la imagen con la clasificación de coberturas. Se creó una tabla que contenía en las columnas los usos de suelo que posee cada punto tomado y

en las filas el uso determinado a partir de la clasificación. La diagonal mayor de la tabla muestra la cantidad de puntos de muestreo que se clasificaron correctamente.

Para determinar la exactitud de la clasificación, se determinó la exactitud global y el estadístico Kappa (3). La exactitud general o global muestra la cantidad de puntos de muestreo clasificados correctamente, representado por la diagonal de la matriz. Este se calculó a partir de la sumatoria de los elementos de la diagonal, divididos por el total de observaciones y multiplicado por 100 para obtener el valor en porcentaje. Entre los usos más frecuentes de este estadístico se encuentra la fotointerpretación, para evaluar cambios en la simulación de usos del suelo (Feng, Gong, Liu y Li, 2015). En este caso calcula la exactitud de la clasificación de acuerdo con la imagen clasificada y los datos de uso de suelo que se obtengan de campo (Nolasco, Bocco, y Scavuzzo, 2017).

El estadístico Kappa se determinó con la siguiente fórmula:

$$K_{hat} = \frac{N * \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r (x_{i+} * x_{+i})}{N^2 - \sum (x_{i+} * x_{+i})} \quad (3)$$

Donde: F

R: Número de filas en la matriz.

x<sub>ii</sub>: Suma de observaciones en la fila i, y columna i (los valores en la diagonal mayor).

x<sub>i+</sub>: Total de observaciones en la fila i (el total en la fila i a la derecha de la matriz).

x<sub>+i</sub>: Total de observaciones en la columna i (total en la columna i debajo de la matriz).

N: Número total de observaciones o puntos de control usados en la validación.

Landis y Koch (1977), agrupan el estadístico kappa en 6 rangos (Cuadro 2), este se encuentra entre los valores de 0 a 1. Los valores cercanos a 1 indican la máxima similitud o concordancia de los datos comparados y 0 indica la ausencia de concordancia de los datos.

**Cuadro 2.** Rangos de clasificación para el estadístico Kappa (K)

<b>Rango</b>	<b>Indicación</b>
0,70 – 1,00	Perfecto
0,61 – 0,80	Muy bueno
0,41 – 0,60	Bueno
0,21 – 0,40	Regular
0,01 – 0,20	Malo
< 0,00	Pésimo

Para la matriz de confusión se calculó la exactitud de usuario y la exactitud del clasificador. La exactitud usuario es la razón entre las unidades muestreadas que se clasificaron correctamente (diagonal) y las unidades que pertenecen a esa categoría que no se asignaron a la clase correcta. Esta se calculó con la razón entre las unidades muestreadas correctamente clasificadas (diagonal) y la cantidad total de unidades que forman parte de esa categoría (clasificación), multiplicado por 100 para obtener el valor en porcentaje. La exactitud del clasificador se refiere a la razón entre las unidades clasificadas correctamente (diagonal) y el número total de unidades que forman parte de dicha categoría (Boca, y Rodríguez, 2012). Para ello se calculó la razón entre las unidades correctamente clasificadas (diagonal) y el número de las unidades muestreadas que pertenecen a esa categoría.

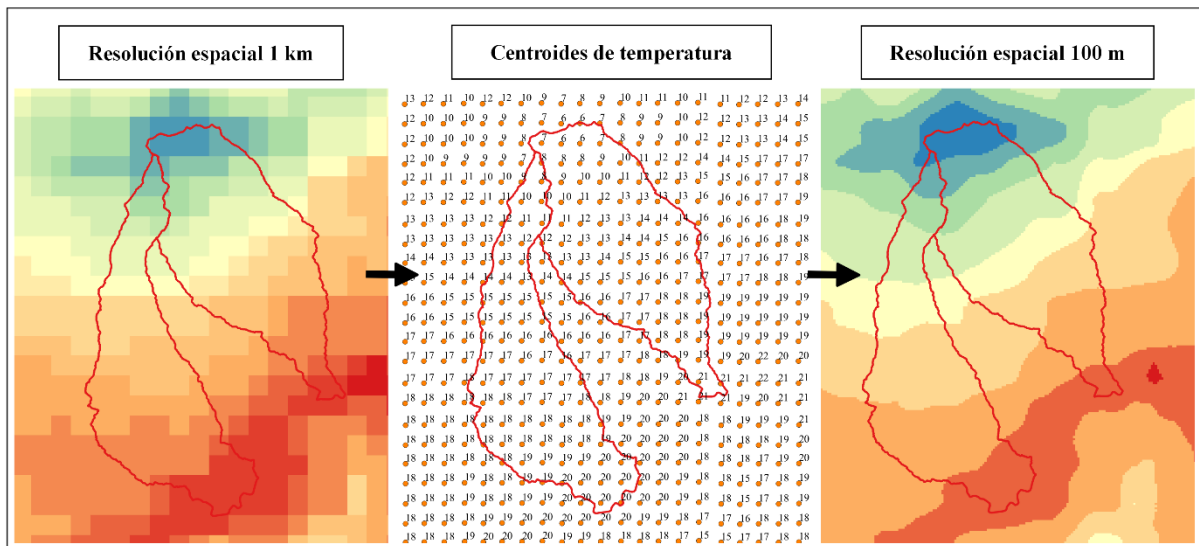
#### 4.3.4. Temperatura y precipitación

Los datos que se utilizaron para elaborar capas de temperatura y precipitación provienen de la base de datos climatológicos WorldClim. Este es un conjunto de datos climáticos mensuales interpolados con una resolución espacial de 1 km<sup>2</sup>. Los datos disponibles corresponden a un rango de tiempo entre 1970-2000, utilizando entre 9000 y 60000 estaciones meteorológicas (Fick, y Hijmans, 2017).

Para verificar la precisión de la información seleccionada, se tomaron datos de estaciones meteorológicas ubicadas dentro del área de las microcuencas y alrededores brindadas por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN). Posteriormente se compararon los valores de

temperatura y precipitación de las capas obtenidas de WoldClim y los valores obtenidos de las estaciones meteorológicas.

Las capas de temperatura y precipitación presentan una resolución muy baja en comparación con las subcuencas (12 metros). Por esto, al generar las capas para el tamaño de las subcuencas, genera un borde brusco entonces, fue necesario reducir la resolución espacial de las capas. Para ello se elaboró una capa de centroides con los valores de temperatura y precipitación de cada píxel. Con la información obtenida de los centroides, se realizó una interpolación con el método estadístico Kriging. Este proceso consiste en asignar pesos a distintos valores determinados por una variable, lo que permite minimizar la varianza de la estimación (Matheron, 1970; Zhang, 1996). La resolución final de las capas de temperatura y precipitación mensual fue de 100 m. En la figura 4 se muestra los cambios obtenidos al realizar el proceso para la variable de temperatura.



**Figura 4.** Reducción de resolución espacial de capas de temperatura y precipitación a partir de centroides con información.

#### 4.4. Corrección de capas disponibles

Las capas clasificadas como “Disponibles”, se tomaron de capas ya existentes en geoportales como el SNIT. En este caso se procedió a generar la información únicamente para los límites de

las subcuencas, utilizando la capa de las subcuencas generada por medio del programa QGIS 3.10 y QSWAT+ 1.2.2. Además, se realizaron correcciones requeridas, entre ellas la corrección de errores de digitación en la tabla de atributos, en el sistema de proyección y el nombre de los archivos. Estas correcciones se realizaron de acuerdo con las recomendaciones y estandarización mencionadas por Fernández-Mora (2018) y Montenegro-Hernández (2018).

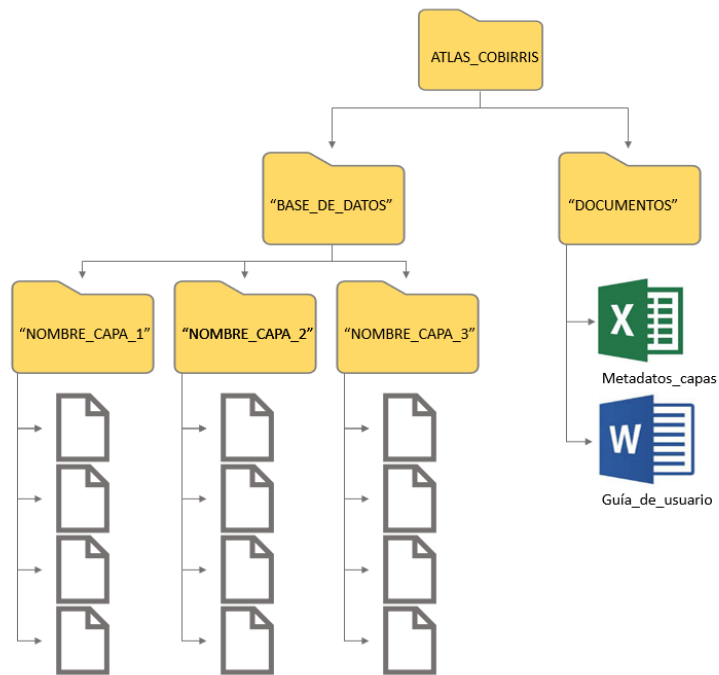
#### **4.5. Elaboración de guía de usuario**

Esta guía fue elaborada principalmente para mostrar a los usuarios, personas e instituciones relacionadas con las subcuencas, el procedimiento seguido para la conformación de las principales capas del Atlas. En este documento se muestra una descripción sobre la capa y caracterización del contenido. Además, se muestra el procedimiento seguido para obtener diferentes índices.

El uso de la guía permitirá utilizar las capas de una forma eficiente, ya que se conocerá previamente su contenido. El documento que se genera se incluyó en la base de datos y de esta forma facilitar la búsqueda de información. Aunado a ello, permitirá al usuario entender lo que representa la variable o dato para su posterior uso. Anexado a este documento, se encuentra un archivo con los metadatos de cada una de las capas, estos metadatos se basaron en el formato utilizado por el SNIT.

##### **4.5.1. Sistema de estandarización de carpetas**

Se elaboró una carpeta denominada “ATLAS\_COBIRRIS, dentro de esta se incluyeron dos subcarpetas. Una de ellas contiene todas las capas, cada una dentro de otra carpeta. El contenido de estas son los archivos necesarios para utilizar las capas. Dentro de otra carpeta se incluyen los documentos de metadatos y guía de usuario (Figura 5).



**Figura 5.** Muestra de sistema de estandarización de la base de datos del Atlas digital de las subcuencas Birrís y Páez.

#### 4.5.2. Acceso a la información

La información generada se organizó de acuerdo con los criterios antes descritos y está disponible en la nube de Google drive. Donde los miembros de la COBIRRÍS-PÁEZ tendrán acceso a ella desde cualquier sitio y podrán compartir la información con otros usuarios.

## 5. RESULTADOS

### 5.1. Identificación de capas

A partir de la revisión de investigaciones y planes de manejo de cuencas hidrográficas, se creó una lista con las capas para elaborar el Atlas Digital de las Subcuencas Birrís y Páez. Posterior a esto se realizó la búsqueda de información e insumos con el fin de definir cuál se encuentra accesible en geoportales o distintas fuentes y cuáles capas es posible generar. Dichos aspectos definieron si se clasificaban como “Disponible” o “No Disponible”. En el cuadro 3 se muestra la lista de capas que fue posible recopilar y generar para conformar el Atlas COBIRRÍS y su clasificación, así mismo la fuente de los datos utilizados. La principal fuente donde se obtuvo la información fue el Atlas Digital de Costa Rica y el SNIT. Para el caso de las capas clasificadas como “No Disponible”, la fuente que se muestra corresponde al origen de insumos necesarios para obtener el producto.

**Cuadro 3.** Lista de capas que conforman el Atlas Digital de las subcuencas Birrís y Páez.

Capa	Clasificación	Fuente
Cantones	Disponible	Atlas Digital de Costa Rica, 2014
Distritos	Disponible	Atlas Digital de Costa Rica, 2014
Poblados	Disponible	Atlas Digital de Costa Rica, 2014
Capacidad de uso del suelo	Disponible	Atlas Digital de Costa Rica, 2014
Zonas de vida	Disponible	Atlas Digital de Costa Rica, 2014
Caminos	Disponible	Atlas Digital de Costa Rica, 2014
Suborden de suelo	Disponible	Centro de Investigaciones Agronómicas
Modelo de Elevación Digital	Disponible	Alaska Satellite Facility
Riesgos y amenazas	Disponible	SNIT
Temperatura	No Disponible	WorldClim
Precipitación	No Disponible	WorldClim
Red hídrica	No Disponible	Atlas digital de Costa Rica y SNIT
Subcuencas	No Disponible	Alaska Satellite Facility
Microcuencas	No Disponible	Alaska Satellite Facility

<b>Capa</b>	<b>Clasificación</b>	<b>Fuente</b>
Uso del suelo	No Disponible	Datos obtenidos en campo

## **5.2. Generación de nuevas capas**

La generación de capas para el área de estudio incluyó los cálculos de índices, estos resultados se incluyen en la tabla de atributos, el título de columna se presenta como una abreviación. Para comprender el contenido presente en las tablas de atributos, para ello se creó un glosario de siglas y abreviaciones con el nombre de la variable y las unidades en las que se encuentra (Anexo 1).

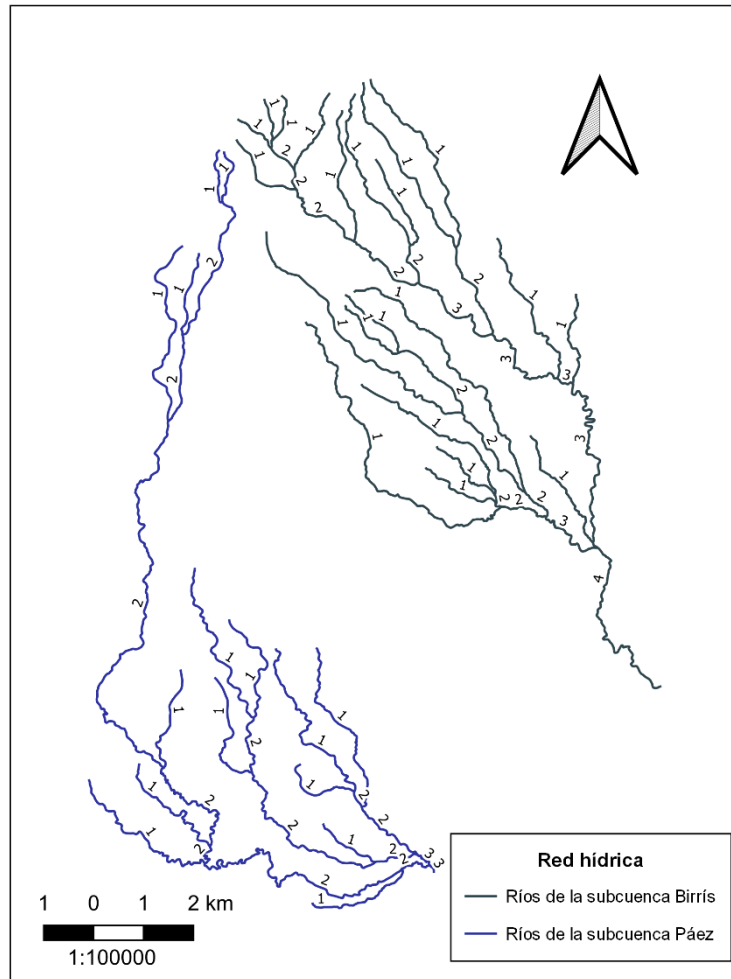
### **5.2.1. Red hídrica**

La red hídrica es uno de los insumos más importantes que se pueden incluir dentro del Atlas Digital con enfoque hidrológico. Esta capa fue necesaria para obtener el número de microcuencas presentes en cada subcuenca. La red hídrica del atlas se creó a partir de la digitalización de dos capas de red hídrica ya existentes. Esto permitió identificar los drenajes permanentes, desde donde nacen y actualizar su trayectoria de acuerdo con una imagen satelital.

En la capa resultante, se muestran los drenajes permanentes y para cada uno de estos, se muestra en la tabla de atributos datos importantes como el nombre, la subcuenca a la cual pertenecen y variables morfométricas. En las giras de campo, se realizaron visitas a las comunidades con el fin de conocer el nombre con el que la comunidad conoce los ríos y quebradas. Sin embargo, para 9 drenajes, los vecinos no conocían el nombre o no fue posible el acceso a ellos.

En total se ubicaron 70 drenajes dentro de las subcuencas Birrís y Páez (Figura 6), los cuales tienen una longitud de 92,717 km y 74,648 km respectivamente. El orden de Strahler que presentan los drenajes es de 4 en la subcuenca Birrís y 3 en la subcuenca Páez.



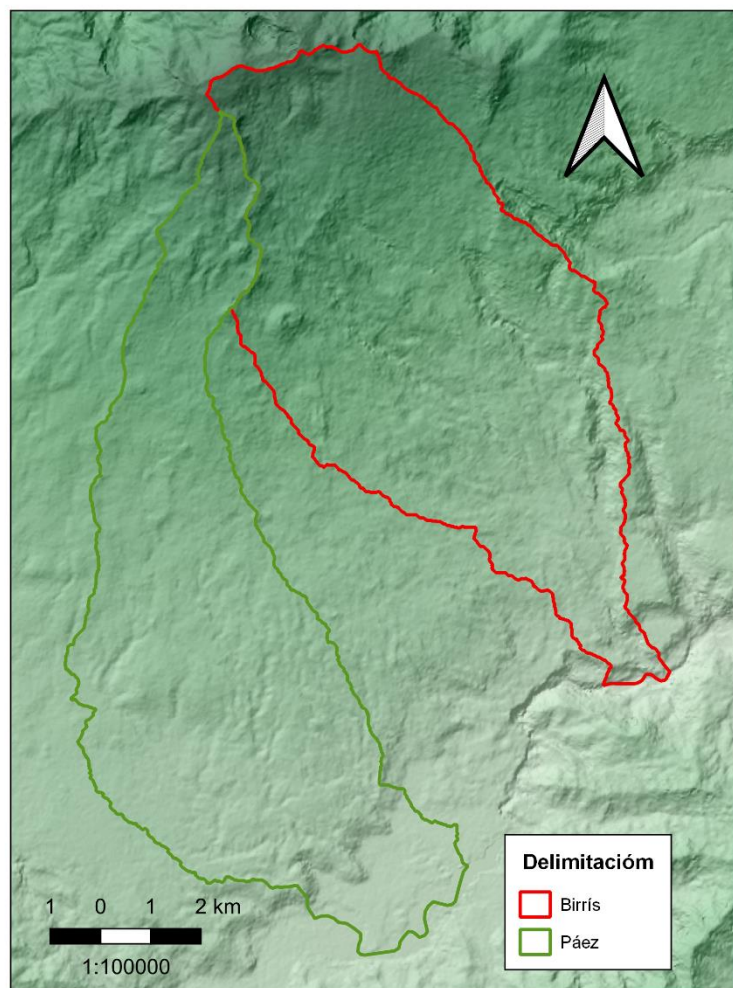


**Figura 6.** Red hídrica de las subcuencas Birris y Páez

### 5.2.2. Subcuencas y microcuencas

Se creó una capa con la delimitación de las subcuencas Birris y Páez y a su vez de las microcuencas. El proceso se realizó a partir de la red hídrica generada y un Modelo de Elevación Digital producto de la misión Alos Palsar (Anexo 2). Posteriormente se hizo una verificación de los bordes de las subcuencas, de acuerdo con las curvas de nivel de las hojas topográficas 1:50000 con el fin de corregir errores de la delimitación.

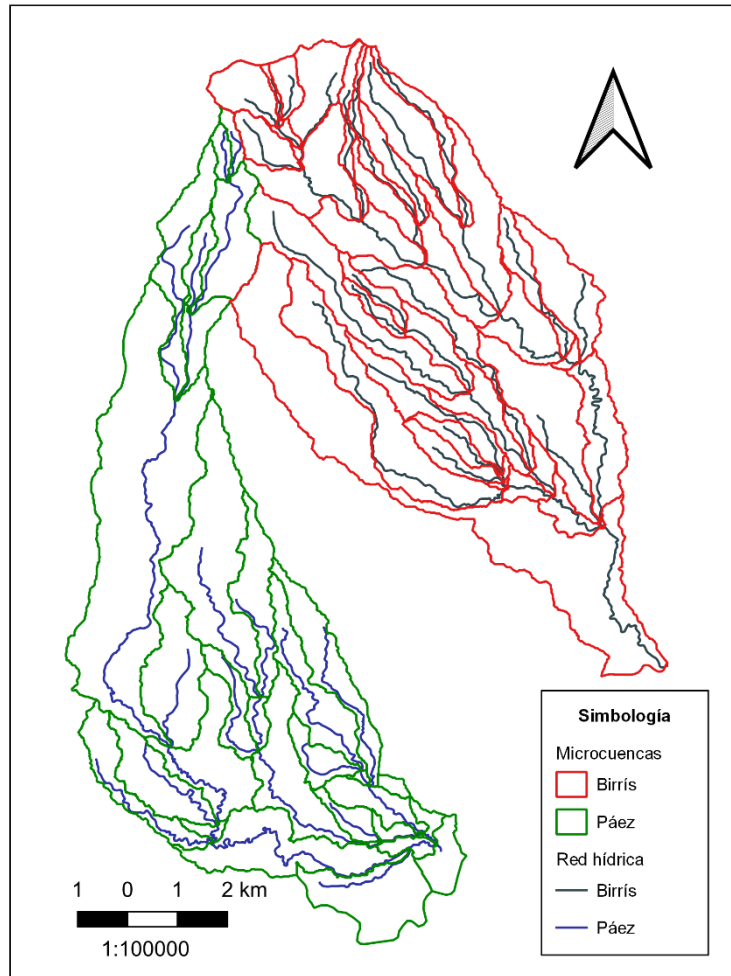
La subcuenca Páez abarca un área de 54,570 km<sup>2</sup> y la subcuenca BIRRÍS un área de 57,961 km<sup>2</sup>. El perímetro de la subcuenca Páez es de 56,512 km y 50,294 km de la subcuenca BIRRÍS (Figura 7).



**Figura 7.** Delimitación de las subcuencas BIRRÍS y Páez.

La delimitación de las microcuencas se hizo de acuerdo con la cantidad de drenajes obtenidos en la red hídrica. Por lo tanto, en la subcuenca BIRRÍS se ubicaron un total de 41 microcuencas y 29 en Páez (Figura 8). Para las microcuencas se determinaron las variables de tiempo de concentración y caudal máximo. Al calcular estos valores a nivel de microcuencas, permite

realizar un análisis con mayor detalle, ya que son áreas que tienden a ser más homogéneas en comparación con las subcuencas.



**Figura 8.** Delimitación de las microcuencas ubicadas en las subcuencas Birris y Páez.

Se calculó el tiempo de concentración para cada una de las microcuencas, el tiempo de concentración más alto que se encontró se ubica en la subcuenca del río Páez, en una de las secciones del río Páez. Este presenta un tiempo de concentración de 0,123 horas. Esto se puede relacionar con la longitud del drenaje, ya que este es también el drenaje con mayor longitud, abarcando 9.366 km. La microcuenca que más rápido evacúa su agua, se localiza en la subcuenca del río Birris. Este tiene un valor de tiempo de concentración 0,004 horas, a su vez representa el tercer drenaje de menor longitud.

Entre los resultados obtenidos de caudal máximo, se muestra que el caudal más alto se ubica en la subcuenca Páez, con 371,901 m<sup>3</sup>/s. Este drenaje es el mismo drenaje con el mayor tiempo de concentración. Dentro de la subcuenca Birrís se localiza el drenaje que reporta menos caudal, este se ubica en la parte alta de la subcuenca, en las faldas del volcán Irazú, presenta 0.216 m<sup>3</sup>/s.

### 5.2.3. Uso del suelo

La capa de uso del suelo se desarrolló por medio de una clasificación supervisada en R (Anexo 3) con una unidad mínima de mapeo de 0,09 ha. Para ello se utilizó una imagen Landsat 8 obtenida del USGS (Anexo 4). En el cuadro 4 se muestra la distribución de área que representa cada uno de los usos del suelo dentro de las subcuencas, así como el respectivo porcentaje. Las coberturas clasificadas corresponden a las actividades que se desarrollan en el área de estudio (Figura 9).

**Cuadro 4.** Distribución áreas de los usos del suelo presentes en las subcuencas Birrís y Páez.

Cobertura	Birrís		Páez	
	Área km <sup>2</sup>	%	Área km <sup>2</sup>	%
Bosque	10,697	18,456	8,446	15,477
Cuerpos de agua	0,031	0,053	1,064	1,950
Cultivos	23,666	40,831	24,354	44,629
Pastos	19,971	34,456	15,316	28,067
Plantaciones	0,855	1,475	0,769	1,409
Infraestructura	2,740	4,727	4,612	8,452
Total	57,961	100,000	54,570	100,000

Como se puede observar, el uso de suelo más común en ambas subcuencas son los cultivos. Dentro de esta categoría se clasificaron todos los usos del suelo que representan un cultivo agrícola, terrenos en descanso y suelos mecanizados. Estas zonas representan un 40,831 y 44,629% del área de las subcuencas Birrís y Páez. Este alto porcentaje se debe a que es una zona de alta producción agrícola, donde se cultivan vegetales y hortalizas para el consumo Nacional.

De acuerdo con el INEC (2015), en la zona norte de Cartago se ubica el 52,87% de fincas productoras de hortalizas del país.

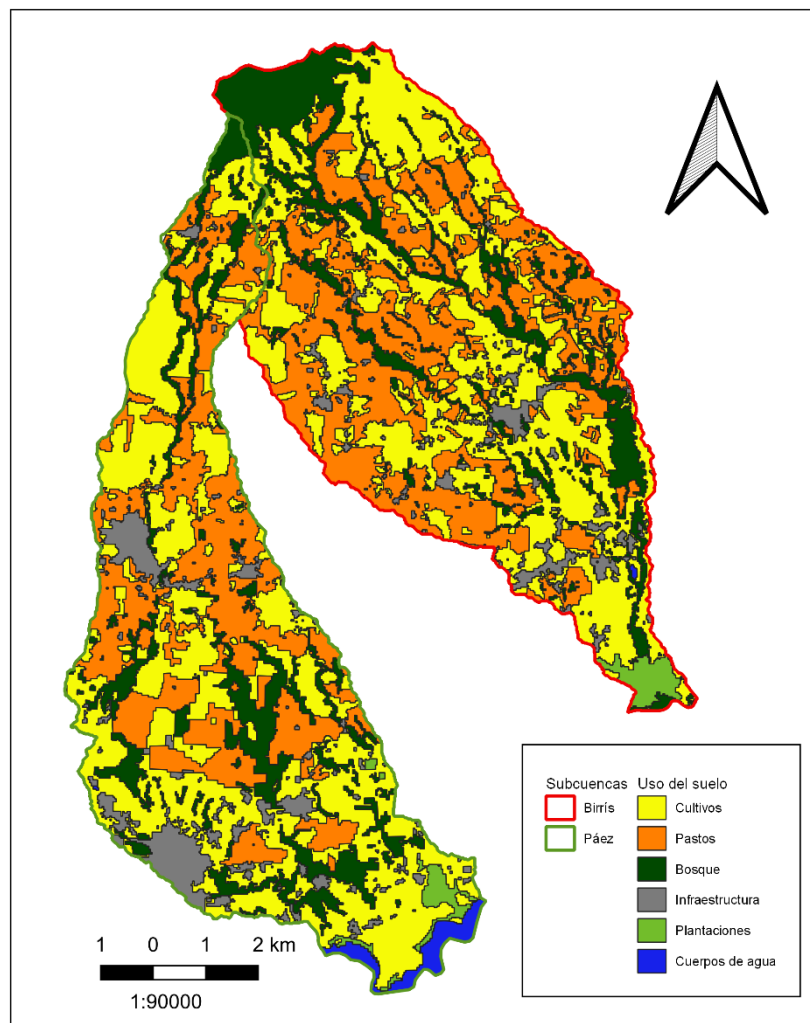
El segundo uso del suelo con mayor área corresponde a pastos, los cuales abarcan un 34,456 y 28,067% de Birrís y Páez respectivamente. Para esta categoría de tomaron en cuenta terrenos con apartos para ganado, terrenos de lecherías y extensiones para la producción de pacas. La parte alta de la subcuenca Birrís, se ha caracterizado por ser una zona generalmente dedicada a la ganadería (Municipalidad de Alvarado, 2016). En caso de la subcuenca Páez, los pastos se encuentran distribuidos a lo largo de la subcuenca, sin embargo se encuentra en mayor proporción en la parte alta y media.

Los bosques representan el tercer uso de mayor extensión, abarcando 18,456 y 15,477% del área total de Birrís y Páez respectivamente. Al ser subcuencas tributarias del río Reventazón y con alto potencial hídrico, es importante conservar la cobertura forestal y de este modo ayudar a la protección del recurso hídrico. A pesar de ello la cobertura boscosa es escasa y se encuentra distribuida principalmente en la margen de los ríos. Uno de los sectores de mayor cobertura boscosa se localiza en el Parque Nacional Volcán Irazú, ubicado principalmente en la subcuenca Páez.

Las áreas urbanas son sectores de importancia, ya que generan impacto en el escurrimiento del agua. A pesar de ello, son áreas necesarias para el desarrollo socioeconómico de la región. En este caso se incluyó como infraestructura toda las áreas urbanas e infraestructura presente en las fincas como casas, lecherías e invernaderos. Dentro de la subcuenca Páez la infraestructura representa un 8,452%, se encuentran tres grandes áreas urbanas ubicadas en Paraíso, Cot y San Juan de Chicué. Para la subcuenca Birrís, la infraestructura abarca un 4,727% y se encuentra distribuida principalmente en Cervantes, Pacayas y Santiago.

En el caso de las plantaciones forestales, estas se diferencian de los bosques ya que son cultivos con fines productivos o establecidas con fines de restauración. El mayor porcentaje se localiza dentro de la subcuenca del río Birrís, abarcan un área de 0,855 km<sup>2</sup> (1,475%), se localizan en la parte baja de la subcuenca. Las plantaciones localizadas en la subcuenca Páez representan un 1,409% de área de la subcuenca, estas se encuentran distribuidas en los alrededores del embalse

de Cachí. Finalmente, los cuerpos de agua son el uso que abarcan menor extensión, 0,053% en Birrís y 1,950% en Páez. Estos representan pequeños embalses y una porción del embalse de Cachí.



**Figura 9.** Coberturas de uso del suelo de las subcuencas Birrís y Páez.

#### *Exactitud de la clasificación*

Después de obtener la clasificación de las coberturas, se procedió a realizar la validación de los resultados. Esto permitió demostrar que se creó una capa con datos congruentes con lo que está presente en campo. Esta validación se llevó a cabo por medio de la comparación de datos tomados en campo y el análisis con el estadístico Kappa. Para realizar la comparación, se tomó

el 30% de los datos tomados que se reservaron para este fin, esta información es independiente a la utilizada para generar la clasificación.

La matriz de confusión mostró una exactitud global de 75 %, este valor expresa el porcentaje de los puntos de muestreo que se clasificaron correctamente. La exactitud global considera los valores que forman parte de la diagonal, sin tomar en cuenta los errores de comisión y omisión. Para solventar dicha limitante se puede utilizar un estadístico multivariado discreto como Kappa (Fallas, 1996). El estadístico Kappa mostró un valor de 0,60 el cual indica la diferencia entre la exactitud obtenida en la clasificación y datos de la clasificación correcta (datos de campo) (Chuvieco, 2010; Boca, y Rodríguez, 2012). Este valor se puede clasificar como bueno de acuerdo con la clasificación mencionada por Landis y Koch (1977). Es importante obtener un valor de referencia que indique la exactitud, esto permitirá a los usuarios conocer de una forma cuantitativa la calidad de los datos y su similitud con la realidad (Lizarazo, 2013).

Entre los resultados obtenidos en la exactitud del clasificador, se muestra que la cobertura urbana tiene un 100 % de probabilidad de que se haya clasificado correctamente. Las coberturas de pastos y cultivos, se clasificaron correctamente en un rango entre 75 y 85%. Para los bosques y plantaciones, la exactitud del clasificador es de 0%, sin embargo esto se debe a la baja cantidad de datos utilizados para realizar la clasificación.

La exactitud usuario mostró que, las coberturas de cultivos y pastos, tienen un 80 % de probabilidad de que estas áreas clasificadas en el mapa, coincida con la clasificación en campo. El uso urbano presentó una exactitud de usuario de 60 % y la peor exactitud la presentan los bosques y plantaciones con un 0 %.

**Cuadro 5.** Matriz de confusión para evaluar la exactitud de la clasificación de uso del suelo de las subcuencas Birrís y Páez.

	Clases de campo					Total clasificación	Exactitud usuario
	1 (Cultivos)	2 (Pastos)	3 (Bosque)	4 (Urbano)	5 (Plantaciones)		
1 (Cultivos)	16	3			1	20	80,000
2 (Pastos)	3	12				15	80,000
3 (Bosque)			0		1	1	0,000
4 (Urbano)		1	1	3		5	60,000
5 (Plantaciones)					0	0	0,000
<b>Total mapa</b>	19	16	1	3	2	<b>41</b>	
<b>Exactitud del clasificador</b>	84,211	75,000	0,000	100,000	0,000	<b>Exactitud general</b>	<b>75,609</b>

Para solventar las bajas exactitudes en los usos del suelo de Bosque y plantaciones, se verificó la clasificación de las coberturas. Para ello se comparó la imagen con la clasificación junto con imágenes satelitales. Por lo que se renombraron los píxeles que no correspondía al uso de suelo que indicaban. Para las secciones donde no había certeza del uso del suelo mostrado en la imagen satelital, se realizaron verificaciones en campo para identificar la cobertura que presenta el sitio.

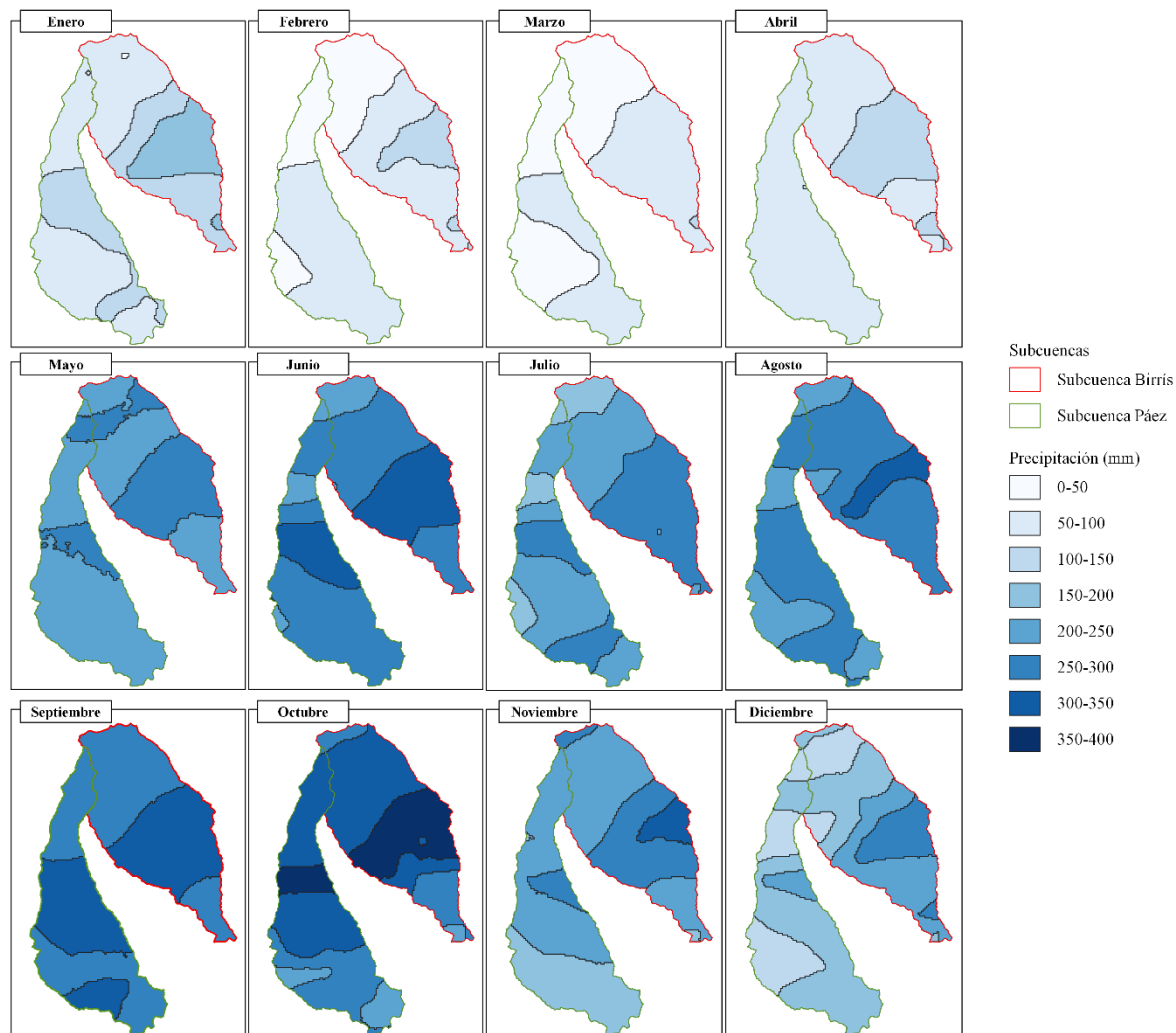
#### 5.2.4. Temperatura y precipitación

Los insumos utilizados para generar la información de temperatura y precipitación provienen de una base de datos climáticos globales. En caso de los datos de temperatura muestran una alta precisión. No obstante, los valores de precipitación tienen una precisión más baja, presentan un coeficiente de correlación de 0,861 (Fick, y Hijmans, 2017).

Entre los resultados mostrados en las capas de precipitación, se muestra que lo meses con mayor precipitación inician en mayo hasta diciembre. El pico de precipitación se da en el mes de octubre, alcanzando aproximadamente 396 mm. Este pico se presenta en la parte media de la subcuenca Birrís, al sur del distrito de Pacayas. En la subcuenca Páez, la mayor precipitación se da en el poblado de Cot. Durante el mes de marzo se presenta las menores precipitaciones, con

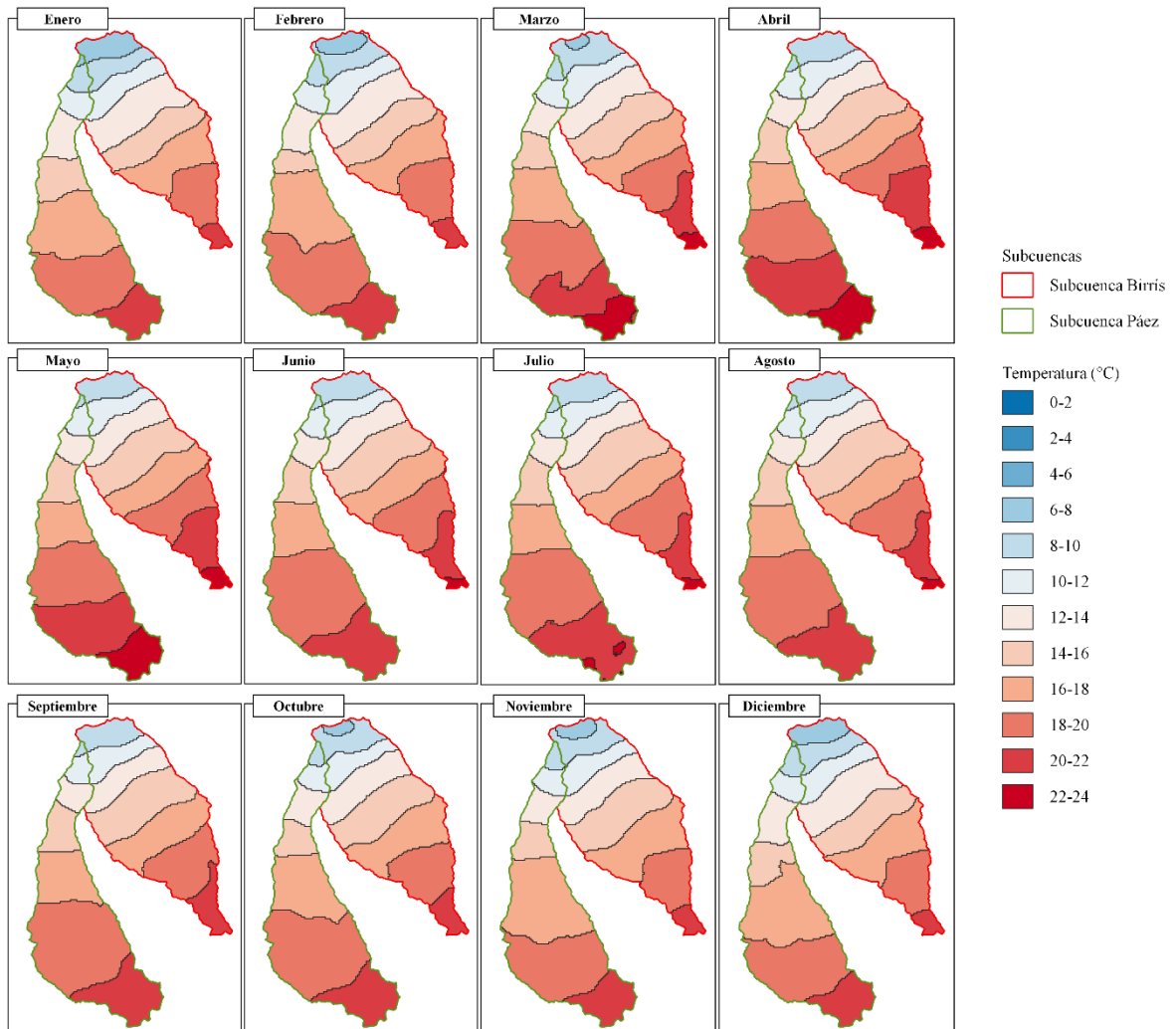


18 mm en las faldas del Volcán Irazú. Esta época de sequía se extiende desde el mes de enero hasta mayo (Figura 10).



**Figura 10.** Distribución de precipitación mensual en las subcuencas Birrís y Páez.

En la figura 11 se muestra el efecto de la elevación en la temperatura, donde se puede observar cómo ésta aumenta al disminuir la elevación. Además, se muestra que la temperatura máxima se da en el mes de abril (23° C) en la parte baja de la subcuenca del Birrís. La temperatura mínima es de 6° C en las faldas del Volcán Irazú.



**Figura 11.** Distribución de temperatura mensual en las subcuencas Birrís y Páez.

### 5.3. Elaboración de guía de usuario

La guía de usuario elaborada permite conocer la secuencia de procedimientos realizados para obtener el valor de caudal máximo, tanto en la elaboración de las capas como las fórmulas empleadas. De este modo explica de que se trata cada una de las variables (Anexo 5). Además, se presenta un glosario con la descripción de las abreviaciones presentes en las tablas de atributos, además un documento de metadatos creado en un archivo de Excel, para cada una de las capas (Anexo 6).

#### 5.4. Estandarización de carpetas

Para la organización de los archivos del Atlas Digital, se crearon carpetas con los nombres de las capas y dentro de estas se incluyen los archivos necesarios para cargar las capas al software QGIS u otro. Con el mismo nivel, se agregaron los archivos del punto anterior (Figura 12), para facilitar el acceso a la información.



**Figura 12.** Organización de la base de datos del Atlas Digital de las subcuencas Birrís y Páez.

#### 5.5. Acceso a la información

Para permitir que los usuarios tengan un fácil acceso a la información, se creó una cuenta en Google drive de acceso público. A esta cuenta pueden ingresar los miembros de COBIRRÍS-PÁEZ y compartirla con externos a partir de un enlace de acceso. Para hacer uso de las diferentes capas se debe descargar la carpeta con los archivos. Esta metodología de almacenamiento

permite que los usuarios externos no realicen cambios en la información, y base de datos. Es decir, solo obtengan una copia de esta y no se realicen modificaciones de una capa. En caso de que se requiera realizar una actualización en alguna de las capas o agregar más contenido a la base de datos, se debe ingresar a la cuenta y cargar la información. Además, al cargar nueva información es importante agregar la actualización en el archivo de metadatos y así mantener un registro.

## 6. CONCLUSIONES

- Se identificaron 15 capas para elaborar, las cuales cuentan con información accesible en geoportales o de fuente propia. A partir de la clasificación realizada, se generaron 6 capas categorizadas como No Disponible y 9 capas Disponibles.
- Las recomendaciones de estandarización de información permitieron corregir errores presentes en los sistemas de proyección en las diferentes capas y facilitar el manejo de estas de una forma más eficiente.
- Se generó la delimitación de las subcuencas Birrís y Páez de acuerdo con la red hídrica actualizada al año 2020.
- Los datos calculados en las capas de red hídrica, uso de suelo y microcuencas, permitieron realizar el cálculo de caudal máximo para cada una de las microcuencas ubicadas en las subcuencas Birrís y Páez.
- Cada una de las capas posee los metadatos necesarios para conocer el origen de la información y características generales de las capas.
- Se elaboró una capa de uso del suelo para el año 2020, esta contiene información importante sobre el área que ocupa cada uno de los usos del suelo. La clasificación tuvo una exactitud de 75 % y un valor de Kappa de 0,6 lo cual se considera como buena.
- La guía de usuario elaborada permite conocer a detalle el proceso para realizar el cálculo del caudal máximo, así como los insumos utilizados.

## **7. RECOMENDACIONES**

- Se recomienda utilizar siempre el mismo sistema de referencia y escritura empleado en la tabla de atributos para facilitar el uso de la información.
- Utilizar y actualizar la información presente en los metadatos cada vez que se realice un cambio en las capas o en la base de datos.
- Se recomienda agregar la información geográfica que se genere por las diferentes investigaciones, en la carpeta ATLAS\_COBIRRRIS/BASE\_DE\_DATOS.
- Para mantener mayor orden en la base de datos y evitar tener más de una versión, se recomienda mantener el Atlas Digital en el sitio web brindado y en este mismo agregar la futura información.
- Se recomienda que el encargado o encargada del atlas sea quien coordina las actividades de COBIRRÍS-PÁEZ.
- En caso de duda sobre la información presente en las capas, se debe revisar la guía de usuario elaborada y los metadatos de las capas.

## 8. REFERENCIAS

- Aguirre, M. (2011). La cuenca hidrográfica en la gestión integrada de los recursos hídricos. *Revista Virtual Redesma*, 5(1). DOI: 10782011000100003&script=sci\_arttext&tlng=en
- Algeciras Castro, K. A., y Bermúdez Bermúdez, J. (2016). *Determinación del Caudal Máximo para Diseño del Puente en la Quebrada Tuaneca sobre la Vía Siachoque–Toca*. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Andrade, M. F. (2018). Atlas - Clima y eventos extremos del Altiplano Central Perú-boliviano / Climate and extreme events from the Central Altiplano of Peru and Bolivia 1981-2010. *Geographica Bernensia*, 188 pp., DOI: 10.4480/GB2018.N01
- André, R. E. G. R., Nascimento, G. S., y Silva, J. (2010). *Atlas digital hidrográfico como recurso de apoio à gestão dos recursos hídrico: o exemplo da XI Região Hidrográfica-rj*. In *II Congresso Fluminense de Iniciação Científica. 15º Encontro de IC da UENF, 7º Circuito de IC do IFF, 3º Jornada de IC da UFF. Campos dos Goytacazes*.
- Aparicio, F. J. (1997). “Fundamentos de Hidrología de Superficie”. Edit. Limusa S.A., España.
- Araya-Ulloa, Andrea, y Calvo-Brenes, Guillermo. (2017). Diagnóstico sobre la vulnerabilidad ecológica y calidad del agua en la quebrada La Central, Pacayas de Alvarado, Costa Rica. *Revista Tecnología en Marcha*, 30(3), 47-58. <https://dx.doi.org/10.18845/tm.v30i3.3272>
- Arroyave, J. A., Builes, L. A., & Rodríguez, E. M. (2012). La gestión socio-ambiental y el recurso hídrico. *Journal of Engineering and technology*, 1(1).
- Artavia, I. (2017). Sistematización cosechando agua pluvial, uniendo pueblos: la experiencia de la ASADA de Paso Ancho y Boquerón, Cartago, Costa Rica.
- Asamblea legislativa. (2012). Ordenamiento y manejo de la cuenca del río Reventazón, N°8023. Costa Rica.
- ASF. (2016). ALOS PALSAR Global Radar Imagery, 2006-2011 (en línea). Consultado 9 jun. 2020. Disponible en <https://www.asf.alaska.edu/sar-data/palsar/>

- Aumassane, C.M., Gaspari, F.J., Beget, M.E., Sartor, P.D., Oricchio, P. y C.M. Di Bella. (2018). Morfometría de la cuenca alta del río Colorado, Argentina. *Boletín geográfico*, 40 (1), 13-29.
- Ballestero, M., y López Lee, T. (2017). El Nexo entre el agua, la energía y la alimentación en Costa Rica: el caso de la cuenca alta del río Reventazón. (LC/TS.2017/105),
- Barraza, G. C., Rocha, W. P., Monjardin, S. A. A., Adrian, J. D. J. U., y González, J. C. B. (2017). Diseño de un modelo de demanda de superficie para la simulación geoespacial de usos de suelo en Novolato y Culiacán, Sinaloa, México. *Persona y Sociedad*, 31(1), 9-26.
- Bazzano, F., Heredia, T., Elías, A., Lamelas, C., y Forciniti, J. (2019). Tendencias en la precipitación en Tucuman bajo efecto del cambio climático. *Meteorológica*, 44, 1-14.
- Benegas, L; Faustino, J. 2008. Bases conceptuales para la planificación de cuencas hidrográficas. Turrialba CR. CATIE, 80 p.
- Boca, T., y Rodríguez, G. (2012). *Métodos estadísticos de la evaluación de la exactitud de productos derivados de sensores remotos*. Instituto de Clima y Agua, INTA Castelar.
- Braz, Adalto Moreira; Mirandola Garcia, Patricia Helena; Pinto, André Luiz; Salinas Chávez, Eduardo; de Oliveira, Ivanilton José. (2020). Manejo integrado de cuencas hidrográficas: posibilidades y avances en los análisis de uso y cobertura de la tierra. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 29(1): 69-85. doi: 10.15446/rcdg.v29n1.76232.
- Brenes Barquero, Y. (2018). Propuesta socioeducativa ambiental para la gestión integral de residuos sólidos, de la población de los distritos de Pacayas y Capellades, del cantón de Alvarado, Cartago: Costa Rica.
- Burgos, A., Bocco, G., y Sosa J. (2015). *Dimensiones sociales en el manejo de cuencas*.
- Burrough, P. A. (1986). *Principles of Geographical. Information Systems for Land Resource Assessment*. Clarendon Press, Oxford.



- Buzai, G., y Ruíz, E. (2012): Geotecnósfera. Tecnologías de la información geográfica en el contexto global del sistema mundo. *Anekumene*. 4, 88-106.
- Camino, M. A., Bó, M. J., Cionchi, J. L., López de Armentia, A., Del Río, J. L., y De Marco, S. G. (2018). Estudio morfométrico de las cuencas de drenaje de la vertiente sur del sudeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina). *Revista Universitaria de Geografía*, 27(1), 73-97.
- Carvajal-Vanegas, D y Calvo-Alvarado, J. 2012. Intercepción de precipitación en dos especies forestales nativas: *Vochysia guatemalensis* Donn. Sm. y *Vochysia ferruginea* Mart. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú* 9(22):32-39.
- Cervantes Zavala, Ronal. (2008). *Propuesta de herramientas para el desarrollo de procesos de cogestión de cuencas hidrográficas en América Central*. Tesis Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. 151 págs
- Chang, M. (2012). *Forest hydrology: an introduction to water and forests*. CRC press.
- Chuvienco, E. (2010). Teledetección ambiental: La observación de la tierra desde el espacio (3ª edición ed.). Barcelona, España: Editorial Ariel. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/366409360/Teledeteccion-Ambiental-Chuvienco>
- Claret, R., Gómez, E y Sánchez, M. (2018). Elaboración de atlas digitales como herramientas del desarrollo territorial. *La Universidad en Contexto*, (1), 31-38.
- Cravero, A., Bianchi, L., Elena, H., Bianchi, A. (2017). Clima de Argentina: Mapas digitales mensuales de precipitación y precipitación menos evapotranspiración potencial. Adenda del Atlas climático digital de la República Argentina; Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- Cotler Ávalos, Helena. (2011). Atlas de la cuenca del lago de Cuitzeo: análisis de su geografía y su entorno socioambiental. *Investigaciones geográficas*, (75), 125-126. Recuperado en 18 de junio de 2020, de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-46112011000200012&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112011000200012&lng=es&tlng=es).

- Cotler, H., Galindo, A., González, D., Pineda, R y Ríos, E. (2013). Cuencas hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión. México, D. F., Semarnat. Recuperado de [http://www.produccion-animal.com.ar/agua\\_cono\\_sur\\_de\\_america/80-Cuencas\\_hidrograficas.pdf](http://www.produccion-animal.com.ar/agua_cono_sur_de_america/80-Cuencas_hidrograficas.pdf)
- Díaz, C., Esteller, M., López-Vera, F. (2005). Recursos hídricos. Conceptos básicos y estudios de caso en Iberoamérica, p I-7, I-8 y I-12.
- Dugarte, M., Ferrer, C., y Delgadillo, A. (2015). Respuesta hidrogeomórfica de una cuenca altamente asimétrica. La tormenta del 11 de febrero del 2005 y su impacto en el río Mocotíes. Mérida-Venezuela. *Revista Geográfica Venezolana*, 56(1), 11-40
- Elosegi, A., y Sabater, S. (2009). Conceptos y técnicas en ecología fluvial. Dinámica y relevancia de la materia orgánica. Barcelona (España): Fundación BBVA, 141-148.
- Esper Angillieri., María Yanina., y Fernández, Oscar Mario. (2017). Morphometric analysis of river basins using GIS and remote sensing of an Andean section of Route 150, Argentina. A comparison between manual and automated delineation of basins. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 34(2), 150-156.
- Esper Angillieri., María Yanina., y Perucca., Laura P. (2014). Caracterización morfométrica de la Cuenca del río Seco a propósito de las fuertes precipitaciones de enero de 2013, Departamento Sarmiento, San Juan, Argentina. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 66(2), 235-245. Recuperado de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-33222014000200003&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-33222014000200003&lng=es&tlng=es).
- Estado del Ambiente. (2017). Capítulo II: el estado del ambiente costarricense. San José, Costa Rica. Recuperado de <http://www.odd.ucr.ac.cr/sites/default/files/IAE2017/02-Capitulo-II-2018.pdf>
- Fallas, J. (1996). Normas y estándares para datos geoespaciales. *Revista Geográfica de América Central*, 32 (33), 41-62.

- FAO y ITPS. (2015). Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report. Rome, Italy. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-i5199e.pdf>
- Feng Q., J. Gong, J. Liu y Y. Li. 2015. Flood mapping based on multiple endmember spectral mixture analysis and random forest classifier: The case of Yuyao, China. *Remote Sens.* 7: 12539-12562.
- Fernández-Eguiarte, A., Zavala-Hidalgo, J., y Romero-Centeno, R. (2010). Atlas climático digital de México. Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM. Available online: <http://atlasclimatico.unam.mx/atlas/kml>.
- Fernández-Mora, MA. (2018). Atlas Digital del Plan Regulador del Cantón de Jiménez, Cartago, Costa Rica. Tesis de Licenciatura. Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica, 254p.
- Fick, S.E. y Hijmans, R.J. 2017. WorldClim 2: new 1km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 37 (12): 4302-4315.
- Gámez, W. (2010). *Texto básico de hidrología*. Managua: Editronic, S.A.
- García Paredes, A. (2018). *Diseño Hidráulico y Estructural de Obras de Protección frente a Erosión e Inundaciones del Río Balsayacu en el Centro Poblado de Balsayacu, Distrito de Campanilla, Provincia de Mariscal Cáceres–Región San Martín*.
- Gaspari, F. J. (2012). Caracterización Morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. Séptimo congreso de medio ambiente. AUMG. La Plata Argentina.
- Gaspari, F. J., Rodríguez, A., Senisterra, G., Delgado, M., y Besteiro, S. (2013). *Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas*. La Plata: Universidad Nacional de La Plata
- Gil, V., Volonté, A., y Campo, A. M. (2019). Índices morfométricos a diferentes escalas aplicados al peligro de crecidas en cuencas pequeñas. Cuenca del arroyo San Bernardo, Argentina. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 20(4).

- Giraut, M. A., Lupano, C. F., Soldano, Á., y Rey, C. A. (2007). *Cartografía hídrica superficial digital de la provincia de Santa Fe. Sistema Nacional de Información Hídrica, Subsecretaría de Recursos Hídricos, Buenos Aires, Argentina*. Recuperado de <http://www.bibliotecacpa.org.ar/greenstone/collect/facagr/index/assoc/HASH70fe.dir/doc.pdf>
- Gómez-Calderón, N., Solórzano-Quintana, M. y Villagra-Mendoza, K. (2017). Cuantificación de la erosión hídrica en función de diferentes técnicas de mecanización para minimizar la contaminación del agua por sedimentos en la parte alta de la Cuenca del Río Reventazón. Recuperado de <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/9164>
- Guevara, R., Olgín, J., Mancilla, R., y Barreto, O. (2019). Análisis morfométrico de la cuenca hidrográfica del río Ayuquila, Jalisco, México. *Geofocus*, 24, 141-158. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.622>
- Gunther Vahrson, W., y Dercksen, P. (1990). Intensidades críticas de lluvia para el diseño de obras de conservación de suelos en Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 14(2), 141-150.
- Guzmán-Arias, I., Watson, F., Villagra-Mendoza, K. (2019). Determinación del caudal ambiental en el río Birrís, Costa Rica. *Tecnología en Marcha*, 32(4). <https://doi.org/10.18845/tm.v32i4.47861>
- Holdridge, L.R. 1967. Life zone ecology. San José, CR, Tropical Science Center. p. 40-43.
- Jankilevich Dahan, C., Aravena Bergen, J., y Von Breymann Fernández, R. (2019). Contribución al Observatorio de Indicadores Relativos al Recurso Hídrico como Factor Primordial para la Sostenibilidad Ambiental y Paisajística en Costa Rica.
- Ibañez Asensio, S., Moreno Ramón, H., y Gisbert Blanquer, J. M. (2007). Métodos para la determinación del coeficiente de escorrentía. Universidad Politécnica de València. 7 p.
- INEC. (2015). VI Censo Nacional Agropecuario: Características de las Fincas y de las Personas Productoras San José, Costa Rica, p. 14.

- JASEC (Junta Administrativa de Servicios Eléctricos de Cartago). (2016). Iluminando el patrimonio: Manejo de cuencas hidrográficas. Cartago: JASEC <https://consulta.jasec.go.cr/index.php/responsabilidad-social/iluminando-el-patrimonio/181-responsabilidad-social/jasec-y-el-ambiente/121-manejo-de-cuencas-hidrograficas>
- Jiménez, F. (2006). Gestión integral de cuencas hidrográficas. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Turrialba–Costa Rica.
- Jiménez, M. (2018). Modelo hidrogeológico conceptual de las cuencas de los ríos Tatiscú y Páez, Provincia de Cartago, Costa Rica. Tesis de licenciatura. Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Jiménez-Otárola, F, y Benegas-Negri, L. (2019). Experiencias y contribuciones del CATIE al manejo y gestión de cuencas hidrográficas en América tropical. *Revista de Ciencias Ambientales*, 53(1), 153-170. Recuperado de [http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2215-38962019000100153&lng=en&tlng=es](http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2215-38962019000100153&lng=en&tlng=es).
- Kapetsky, J y Meaden, G. (1992). Los sistemas de información geográfica y la telepercepción en la pesca continental y la agricultura, Roma, Italia: Org. De La Naciones Unidas Para la Agricultura y la Alimentación
- Kirpich, Z.P. (1940). Time of concentration of small agricultural watersheds. *Civil Eng.* 10 (6),362.
- Landis J. Richard, Koch Gary G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33(1), 159-174. doi:10.2307/2529310
- Ledezma, A. (2009). Diagnóstico Inicial de la Situación de los Residuos Sólidos en la Municipalidad de Paraíso. Cartago, CR.: Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR).
- Ley Forestal N° 7575. Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica, Diario Oficial La Gaceta N° 72, San José, Costa Rica, 16 de abril de 1996.

- Lianes, E., Marchamalo, M., y Roldán, M. (2009). Evaluación del factor C de la RUSLE para el manejo de coberturas vegetales en el control de la erosión en la cuenca del río Birrís, Costa Rica. *Agronomía Costarricense*.
- Lizarazo, I. (2013). Introducción al procesamiento de imágenes usando GRASS GIS 7.0- versión 0.3; Recuperado de [https://download.tuxfamily.org/tuxgis/geodescargas/il\\_pdi\\_grass\\_0.3.pdf](https://download.tuxfamily.org/tuxgis/geodescargas/il_pdi_grass_0.3.pdf)
- Llopis, J. P. (2008). *Sistemas de Información Geográfica aplicados a la Gestión del Territorio*. Alicante: Editorial Club Universitario.
- Maderey, L y Jiménez, A. (2005). Principios de Hidrogeografía Estudio del Ciclo Hidrológico, p. 11. Recuperado de [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=0S3XDWsDzSAC&oi=fnd&pg=PA7&dq=ciclo+hidrol%C3%B3gico+&ots=2R5Ekqn-SE&sig=x4Ouy7yDjbo1z0K7ie\\_YglqeK5M#v=onepage&q=ciclo%20hidrol%C3%B3gico&f=true%B3gico&f=true](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=0S3XDWsDzSAC&oi=fnd&pg=PA7&dq=ciclo+hidrol%C3%B3gico+&ots=2R5Ekqn-SE&sig=x4Ouy7yDjbo1z0K7ie_YglqeK5M#v=onepage&q=ciclo%20hidrol%C3%B3gico&f=true%B3gico&f=true).
- MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería, Costa Rica). (2016). Minuta de la Comisión Nacional de Papa y Cebolla, 8 jun. San José, Costa Rica. 9 p.
- Marchamalo, M. (2005). Ordenación del territorio para la producción de servicios ambientales hídricos. Aplicación a la cuenca del Río Birrís, Costa Rica. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España. 409 p.
- Martín Vide, J. P. (2003). *Ingeniería de ríos*. Barcelona - España: Alfaomega
- Martínez, Y., Villalejo, V. (2018). La gestión integrada de los recursos hídricos: una necesidad de estos tiempos. *Ingeniería hidráulica y ambiental*, 39(1), 58-72.
- Matheron G. (1979). La theorie des variables regionalisées et ses applications. Centre Geostatistique et de Morphologie Mathématique, Ecole National Superior des Mines de Paris. Recuperado de [https://books.google.co.cr/books/about/La\\_Theorie\\_des\\_variables\\_regionales.html?id=fxCAZwEACAAJ&redir\\_esc=y](https://books.google.co.cr/books/about/La_Theorie_des_variables_regionales.html?id=fxCAZwEACAAJ&redir_esc=y)

- McCuen, R. (1998) "Hydrologic Analysis and Design". 2ed. Prentice Hall.
- Medina, E. (2017). Empleo de sistemas de información geográfica para el análisis de problemas espaciales. *Ciencia, Innovación y Tecnología*, 3, 7-17.
- Moreira, M. C., Silva, D. D., y Silva, M. P. D. (2010). *Atlas hidrológico da bacia hidrográfica do rio Grande*. Santa Cruz do Sul: Gazeta Santa Cruz.
- Montenegro-Hernández, E. (2018). Atlas digital del plan regulador del cantón de Alvarado, Cartago, Costa Rica. Tesis de Licenciatura. Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
- Municipalidad de Alvarado. (2016). Historia del Cantón. Recuperado de: <http://www.munialvarado.go.cr/index.php/mn-conozcanos/mn-micanton/mn-historiacanton>
- Murillo, M. (2010). El escurrimiento superficial, métodos para su estimación en conservación de suelos. Viceministerio de desarrollo rural y tierras. Recuperado de <https://fundacionvalles.org/wp-content/uploads/2019/09/Escurrecimiento-Superficial.pdf>
- Nolasco, M., Bocco, M., y Scavuzzo, C. (2017). Mapeo de cultivos agrícolas en Córdoba: una comparación del desempeño de tres algoritmos de clasificación. IX Congreso Argentino de AgroInformática (CAI 2017)-JAIIO 46-CLEI 43
- Oliveira, P., Ditra, A., y Ceruti, C. (2012). Qualidade das águas superficiais e o uso da terra: estudo de caso pontual em bacia hidrográfica do oeste do Paraná. *Revista Floresta e Ambiente, Seropédica*, 19(1)
- Organización meteorológica mundial (OMM). (2012). International Glossary Of Hydrology, p. 337. Recuperado de <http://unesdoc.unesco.org/images/0022/002218/221862M.pdf>.
- Otárola Guerrero, M. 2007. Informe final de consultoría: Sistematización y recopilación de información y datos relevantes para el proyecto "contribución a la política de pago por servicios hidrológicos para el sector hidroeléctrico de Costa Rica". Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba, Costa Rica. 31pp.

- Parra, L., Montealegre, H. (2020). Diseño de estrategias de conservación, mejoramiento y aprovechamiento del recurso hídrico en el sector sur de la Cuenca Hidrográfica de Río Seco—Revisión Sistemática. *Journal of business and entrepreneurial studies*, 4(1).
- Peña, J. (2018). Caracterización del sistema hidrográfico del río Huaca, su flora, fauna y la propuesta de un modelo de gestión. (Tesis de maestría, Vicerrectorado en investigación, innovación y transferencia de tecnología). Recuperado de <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/15163/1/T-ESPE-057978.pdf>
- Pérez, E. (2014). La oportunidad de un atlas sobre el estado del continente africano. *Vegueta: Anuario de la Facultad de Geografía e Historia*. 14. 135-154.
- PREVDA (Programa de Reducción de la Vulnerabilidad y Degradación Ambiental). (2008). Plan de cuenca del río Reventazón-Parismina 2008-2010. San José, Costa Rica
- Ramírez, P. (2006). Caracterización de la dinámica de flujo mediante la aplicación de un modelo numérico hidrogeológico. Caso de la cuenca del río Birrís, Cartago, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central* 33-34. 83-97.
- Ramírez, P., y Arias, M. (2011). Lineamientos de ordenamiento territorial para el manejo y protección del agua subterránea en la cuenca del río Birrís (Cartago). *Revista de Ciencias Ambientales*, 41(1), 47-54.
- Registro Nacional. 2016. SINIT. Infraestructura Nacional de Datos de Espaciales de Costa Rica. <http://www.snitcr.go.cr/about> Consultado el 23 de junio del 2020.
- Rodríguez, A., Gaspari, F., Sinisterra, G., Delgado, M., y Besteiro, S. (2012). Evaluación del efecto de la restauración agro-hidrológica mediante la aplicación del modelo hidrológico GeoQ. *Revista Investigaciones Agropecuarias*, 38, pp. 171-181. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/864/86423631013.pdf>
- Rojas, N. (2011), Estudio de las cuencas hidrográficas de Costa Rica, análisis biofísico, climático y socioeconómico.



- Rojas, S., Obando, F y Casimiro, L. (2017). Atlas de erosión de suelos por regiones hidrológicas del Perú. Dirección de Hidrología, Lima, Perú Recuperado de <http://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/261>
- Sáenz, F. (2013). Política agrícola en Costa Rica y su efecto sobre el campesinado. ¿Tendrá la educación “alguna vela en este entierro”? *Revista Educare*, 3, 87-101.
- Salazar, L. (2016). IGN Cartografía 1:25000. [en línea]. San José, Instituto Geográfico Nacional-Registro Nacional.
- Sandoval, D., Mata, R. (2014). Base de perfiles de suelos de Costa Rica. [en línea]: Versión 1. 2 San José, Costa Rica. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo (ACCS). Recuperado de <http://www.suelos.ucr.ac.cr/>
- Schulz, C., Y García, R. (2015). *Balance hídrico y recarga de acuíferos*, p. 5, 9 y 10. Recuperado de [http://aihcl.org/cursos/Balance\\_y\\_Recarga\\_de%20Acuiferos\\_Version\\_Final.pdf](http://aihcl.org/cursos/Balance_y_Recarga_de%20Acuiferos_Version_Final.pdf).
- SENARA. (2005). Hidrogeología, Cantón de Cartago (sector incluido del GAM). Provincia de Cartago, Costa Rica. Recuperado de [http://www.senara.or.cr/acerca\\_del\\_senara/direcciones/direccion\\_de\\_investigacion\\_y\\_gestion\\_hidrica/mapas\\_hidrogeologicos/Cartago\\_hidrogeologia.jpg](http://www.senara.or.cr/acerca_del_senara/direcciones/direccion_de_investigacion_y_gestion_hidrica/mapas_hidrogeologicos/Cartago_hidrogeologia.jpg)
- Senisterra, G., Rodríguez Vagaría, A., Gaspari, F. y G.Mazzucchelli. (2014). Aspectos morfométricos de la cuenca alta del Arroyo Napaleofú. Provincia de Buenos Aires, Argentina. *Revista Geográfica Venezolana*, 55(2) 287-303. Mérida. Venezuela. Disponible en <http://www.saber.ula.ve/handle/123456789/39614>
- Sigala, M. (2009). Geoportals and geocollaborative portals: Functionality and impacts on travellers` Trip Panning and Decision Making Process. Internacional CHRIE Conference-Referred Track, Paper 28, 1-8.
- Silva, M. P., Santos, F. M. D., & Leal, A. C. (2016). Planejamento ambiental da bacia hidrográfica do córrego da Olga, UGRHI Pontal do Paranapanema–São Paulo. *Sociedade & Natureza*, 28(3), 409-428.

- Soil Survey Staff. 2007. Keys to soil taxonomy. Washington, DC, US, USDA-NRCS. p. 435-512.
- Soto, C. (2007). Ríos 1:50mil. [en línea]. Cartago, Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Strahler A. N. (1952). *Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography*". *Bulletin of the Geological Society of America*, Vol. 63: 1117-1142.
- Tencio, R. (2013). Información General de la Región Central Oriental. San José, CR.: Ministerio de Ganadería y Agricultura (MAG).
- Vargas Cabezas, F. (2010). *Estimación de pérdida de carbono en el suelo por erosión hídrica laminar bajo diferentes escenarios de producción hortícola y ganadera en la subcuenca del río Birrís, Costa Rica* (No. Thesis V297ei). CATIE.
- Villón, M. (2004). Hidrología. Cartago, Costa Rica, ITCR. 400 p.
- World Vision. (2004). Manual de Manejo de Cuencas. El Salvador. 154 p
- Zaldívar, J. (2017). La cuenca hidrográfica como propuesta de unidad de análisis y gestión sustentable de territorio. (tesis de maestría). Universidad de Chile, Santiago, p. 9.
- Zumbado, F., y Mesén, R. (2018). Gestión de cuencas y turismo. Caso de la cuenca del Río Frío, Guatuso, Costa Rica. *Economía, sociedad y territorio*, 18(56), 141-163.  
<https://dx.doi.org/10.22136/est20181110>

## 9. ANEXOS

**Anexo 1.** Glosario de siglas y abreviaciones de las tablas de atributos.

### 1. Red hídrica

**ID:** Número de Identificación de los elementos presentes en la capa.

**ORDEN:** Grado de bifurcación según el orden de Strahler.

**SUBCUENCA:** Nombre de la subcuenca que representa o pertenece el elemento.

**NOMBRE:** Nombre del río o drenaje que representa.

**LONG\_km:** Longitud de los drenajes, cuya unidad de medición es en kilómetros.

**PENDIENT\_%:** Pendiente media de los drenajes, representada en porcentaje.

### 2. Subcuencas

**SUBCUENCA:** Nombre de la subcuenca que representa el elemento.

**AREA\_km2:** Área del elemento, expresado en kilómetros cuadrados (km<sup>2</sup>).

**PERIME\_km:** Perímetro del elemento representado en kilómetros (km).

**PENDIENT\_%:** Pendiente media de las subcuencas, representada en porcentaje.

**ELMED\_msnm:** Elevación media de las subcuencas, representada en metros sobre el nivel del mar (msnm).

**ELMAX\_msnm:** Elevación máxima de las subcuencas, representada en metros sobre el nivel del mar (msnm).

**ELMIN\_msnm:** Elevación mínima de las subcuencas, representada en metros sobre el nivel del mar (msnm).

### 3. Microcuencas

**SUBCUENCA:** Nombre de la subcuenca a la que pertenece el elemento.

**AREA\_km2:** Área del elemento, expresado en kilómetros cuadrados (km<sup>2</sup>).

**PERIME\_km:** Perímetro del elemento representado en kilómetros (km).

**PENDIENT\_%:** Pendiente media de las microcuencas, representada en porcentaje.

**TIEM\_CON\_h:** Tiempo de concentración de las microcuencas, expresado en horas (h).

**ID\_RED\_HID:** Número de identificación del drenaje principal de cada microcuenca. Este

número concuerda con el “ID” de la capa de Red Hídrica.

**CAMAX\_m3/s:** Caudal máximo de las microcuencas, expresado en metros cúbicos por segundo ( $m^3/s$ ).

**ELMED\_msnm:** Elevación media de las microcuencas, representada en metros sobre el nivel del mar (msnm).

**ELMAX\_msnm:** Elevación máxima de las microcuencas, representada en metros sobre el nivel del mar (msnm).

**ELMIN\_msnm:** Elevación mínima de las microcuencas, representada en metros sobre el nivel del mar (msnm).

#### **4. Temperatura**

**ID:** Número de identificación del elemento.

**TEMP\_°C:** Valor de temperatura que representa cada elemento, expresado en Centígrados ( $^{\circ}C$ ).

#### **5. Precipitación**

**ID:** Número de identificación del elemento.

**PRECI\_mm:** Rango de precipitación que representa cada elemento, expresado en milímetros (mm).

#### **6. Uso de suelo**

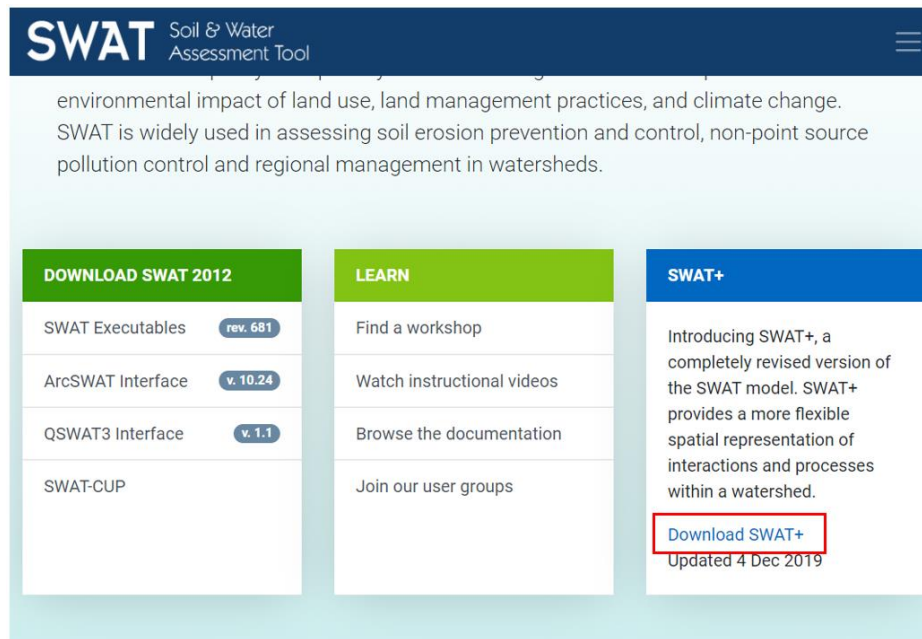
**COBERTURA:** Tipo de cobertura que representa cada elemento.

**AREA\_km2:** Área del elemento, expresado en kilómetros cuadrados ( $km^2$ ).

## Anexo 2. Tutorial para la delimitación de cuencas con QSWAT+1.2.2.

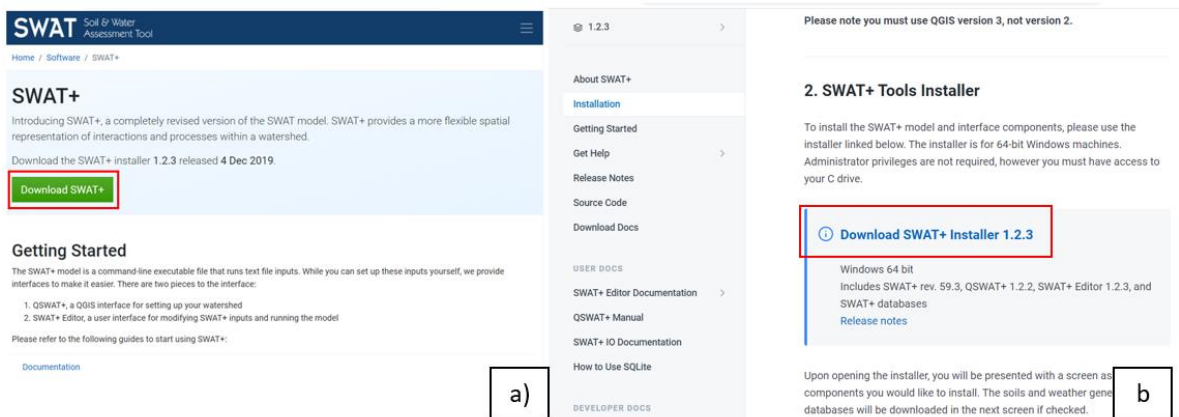
### Descarga de SWAT

Para descargar el complemento SWAT se debe ingresar a la dirección <https://swat.tamu.edu/>. Cuando se trabaja con el programa QGIS, se debe utilizar una versión compatible, en este caso se trabaja con SWAT+, la cual es compatible con la versión más estable de QGIS, para este proyecto la versión utilizada fue QGIS 3.10. sin embargo puede cambiar con las futuras actualizaciones. Para realizar la descarga se debe ingresar al enlace “Download SWAT+” (Figura 1).



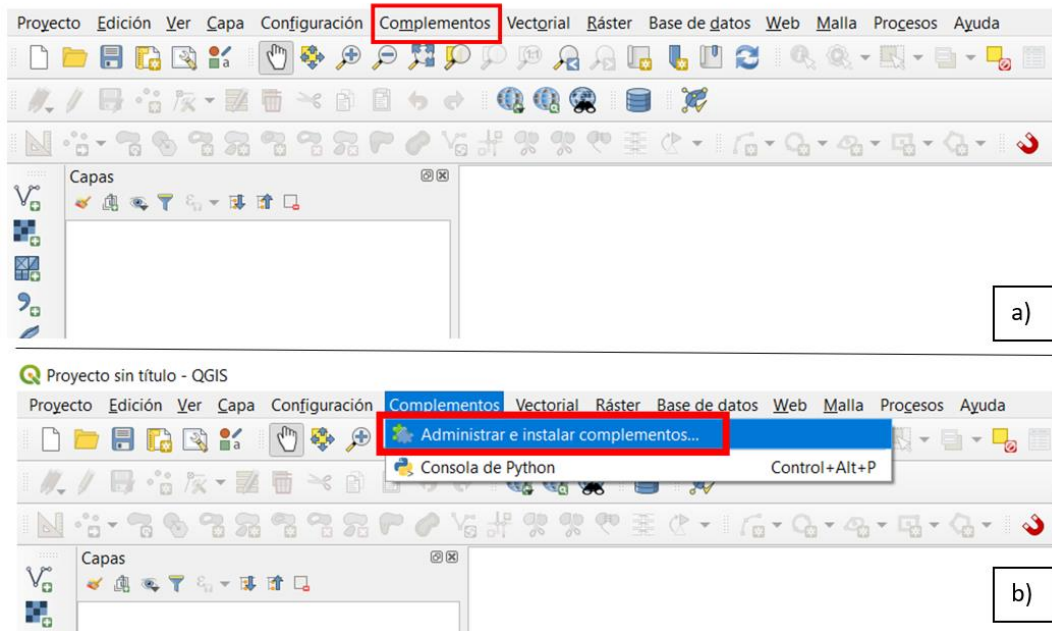
**Figura 1.** Versión de SWAT para la delimitación de cuencas con QGIS.

Dicho enlace dirige a una página con la descripción del complemento, donde se detalla las funciones de las herramientas; la descarga se realizará desde el enlace “Download SWAT+” (Figura 2a) y posteriormente seleccionar “Download SWAT+ Installer 1.2.3” (Figura 2b). Antes de realizar la descarga, es importante tener instalado en la computadora la versión más estable del programa QGIS.



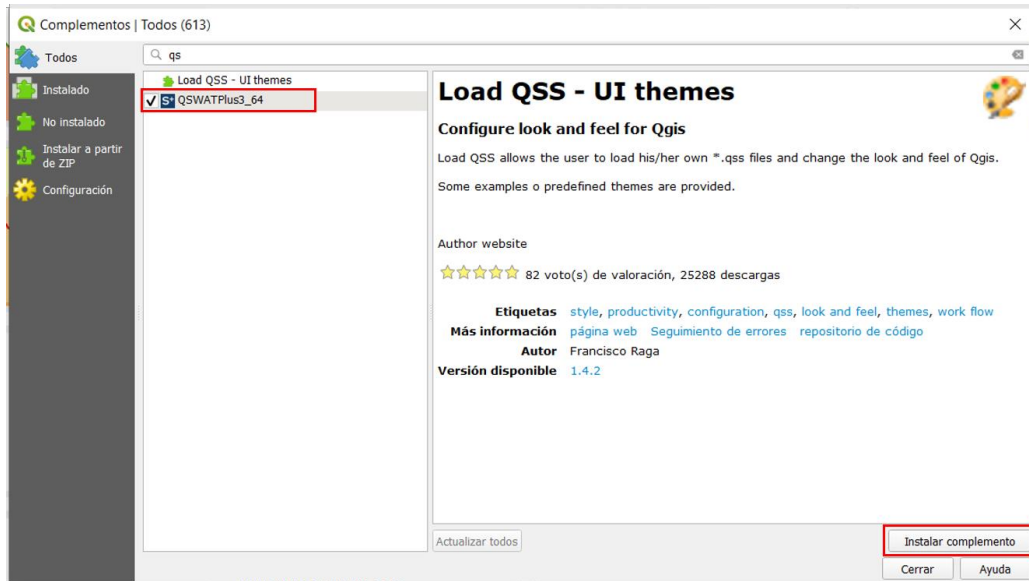
**Figura 2.** Dirección de descarga de SWAT+.

Cuando la descarga se ha completado, se debe dirigir a la dirección donde se guardaron los archivos descargados, se debe extraer los documentos y seleccionar el instalador de programa. Se desplegarán diferentes ventanas para configurar el complemento, todas las opciones se deben dejar según aparezcan como predeterminadas. Al finalizar la instalación, se debe dirigir al programa QGIS para instalar el complemento, se debe seleccionar la pestaña de “Complementos” (Figura 3a) y “Administrar e instalar complementos” (Figura 3b).



**Figura 3.** Dirección para la instalación del complemento SWAT en QGIS 3.10.

Se desplegará la ventana de los complementos con los que cuenta QGIS, en la barra del buscador se puede filtrar el complemento deseado. Cuando se localiza el complemento “QSWATPlus3\_64” en la lista, se debe marcar y posteriormente seleccionar “Instalar Complemento” para iniciar el proceso (Figura 4).



**Figura 4.** Instalación del complemento SWAT+ en QGIS 3.10.

Al finalizar la instalación, en el panel de herramientas se debe visualizar el logo de SWAT+ (Figura 5), lo cual indica que la instalación se realizó correctamente.

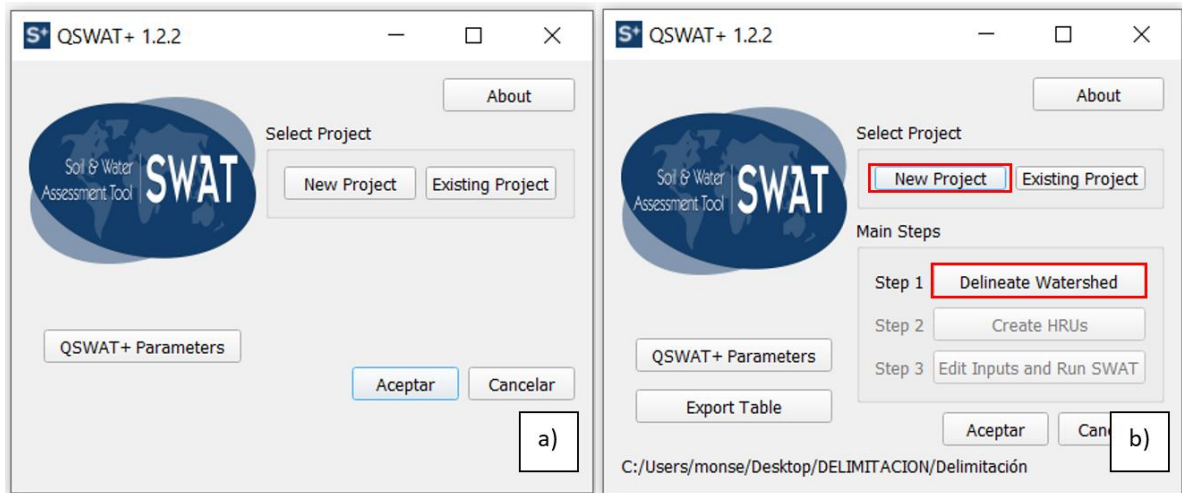


**Figura 5.** Verificación de la instalación del complemento SWAT+.

### **Delimitación de cuencas con QSWAT+ 1.2.2**

Al seleccionar el logo de SWAT+, se desplegará la ventana que se muestra en la figura 6a, para crear un proyecto nuevo se debe usar la opción “New Project” y seleccionar la ubicación donde

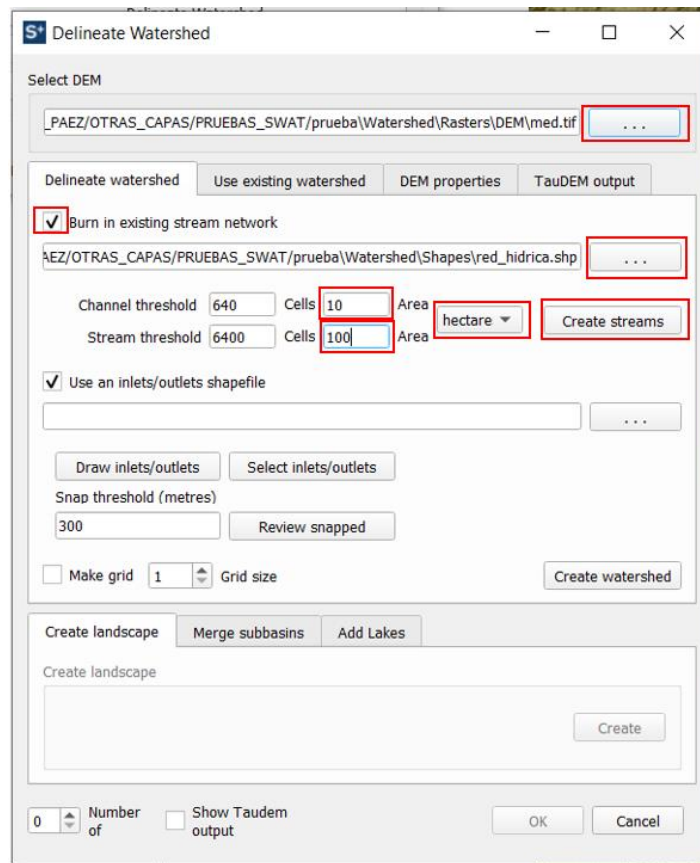
se desea guardar. Posteriormente, se habilitará la opción de “Delineate Watershed” donde se podrá ingresar a la ventana con la configuración para la delimitación de cuencas (Figura 6b).



**Figura 6.** Ventana de inicio para la delimitación de cuencas con QSWAT+

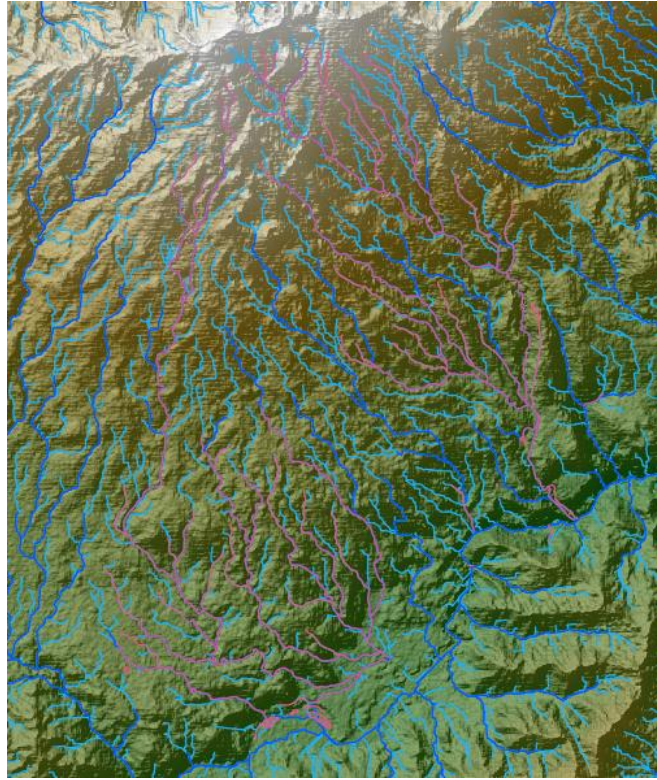
En la ventana de configuración para la delimitación de cuencas, se muestran las variables necesarias. La primera variable que se requiere es un modelo de elevación del área en estudio, este se debe ingresar en “Select DEM”. El siguiente parámetro es la red hídrica, este es útil para delimitar mejor el área para crear los drenajes. Para Cargar la red hídrica se debe activar la opción de “Burn in existing stream network”. Los siguientes parámetros que se deben configurar son “Channel threshold” y “Stream threshold”, en estos se debe indicar las unidades en las que se desea trabajar y definir los umbrales que definen la cantidad de celdas que se dirigen a un píxel (dirección y acumulación de flujo). Esto ayuda a generar un mayor o menor detalle en la generación de la red hídrica, por lo cual es importante utilizar distintos valores hasta definir el adecuado. Finalmente, se debe seleccionar “Create streams” para generar la red hídrica de SWAT (Figura 7). Es importante que tanto el Modelo de Elevación como la red hídrica se encuentren en el mismo sistema de proyección, en este caso se utilizó CRTM05.





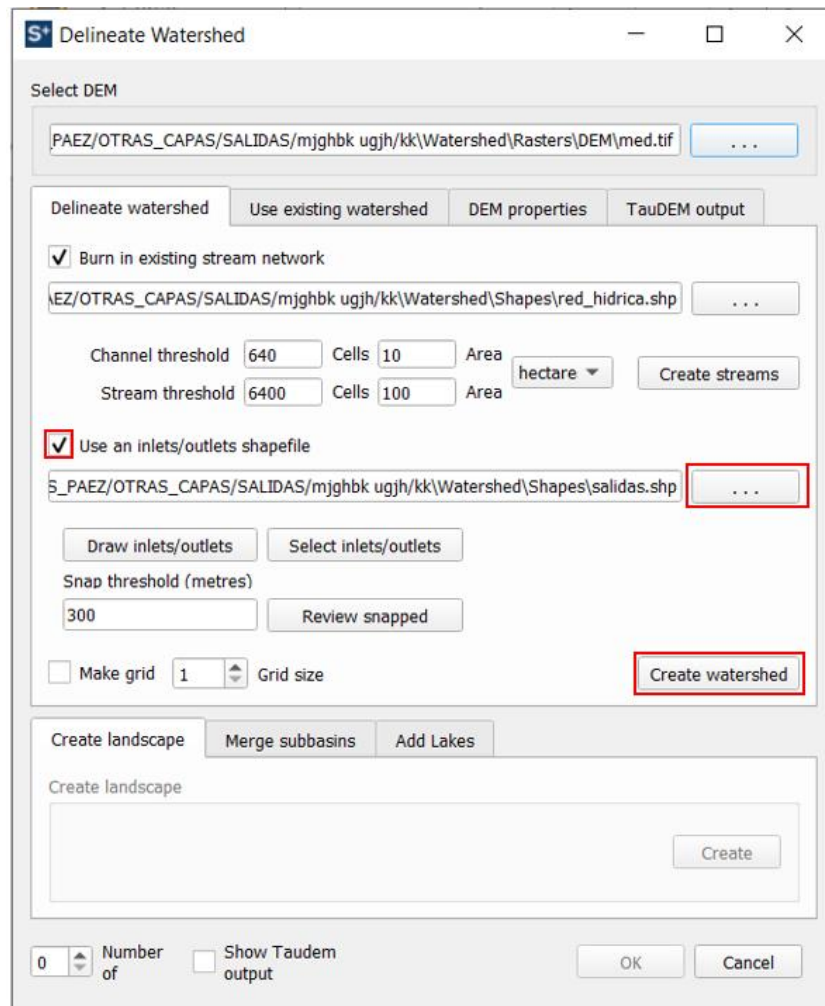
**Figura 7.** Configuración de QSWAT para generar una red hídrica.

El proceso puede tardar unos minutos, al terminar se generará una red hídrica para la mayor parte del área del Modelo de Elevación que se indicó antes. En la figura 8 se muestra la red hídrica generada por QSWAT (azul y celeste) y la red hídrica que el usuario cargó al programa (Rosado).



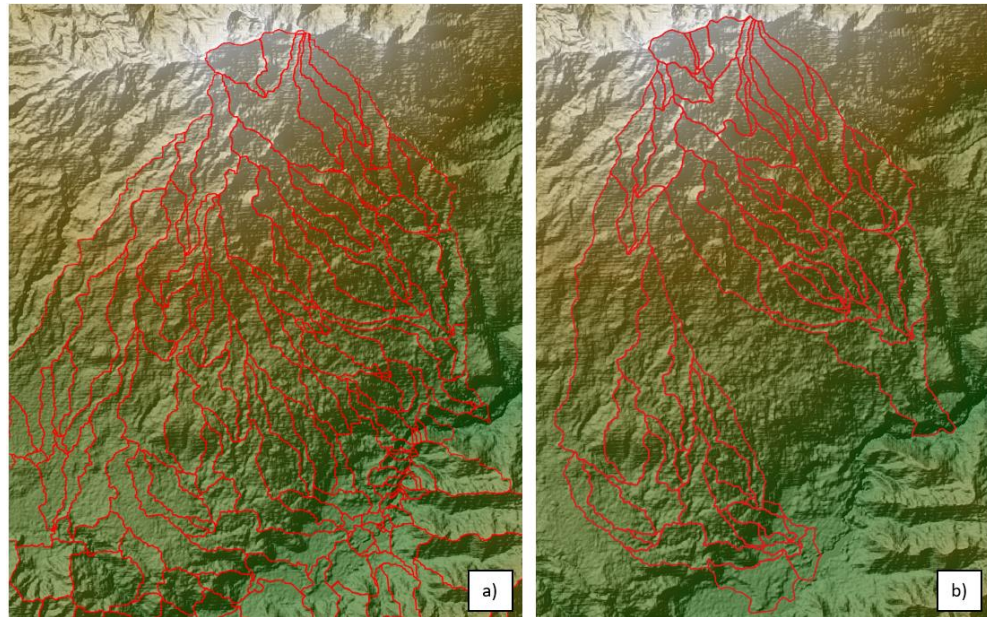
**Figura 8.** Visualización de la red hídrica generada por QSWAT y la red hídrica existente.

Finalmente, en la opción “Use an inlets/outlets shapefile” se puede cargar un archivo shape donde se indiquen los puntos de salida de los drenajes. Este archivo ayuda al programa a identificar hasta donde se delimitan las cuencas, por lo cual estos deben estar ubicados correctamente. Para crear las cuencas se debe seleccionar “Create Watershed” (Figura 9).



**Figura 9.** Configuración para el ingreso de puntos de salida de las cuencas.

Al finalizar el proceso, el resultado es la delimitación de las microcuencas según el umbral indicado en la red hídrica. Puede que en el resultado se delimiten otras áreas que no forman parte de las subcuencas (Figura 10a), por lo cual es importante exportar la capa “SWAT subbasin” y eliminar las áreas que no corresponden al sector en estudio para obtener solo la delimitación de las cuencas (Figura 10b).



**Figura 10.** Resultado de la delimitación de cuencas con QSWAT.

**Anexo 3.** Procedimiento para realizar la clasificación supervisada en R.

<b>Función</b>	<b>Descripción</b>
<pre>install.packages("RStoolbox") install.packages("raster") install.packages("rgdal") install.packages("e1071")</pre>	<p>Para hacer uso de las diferentes funciones que se presentan en R, es necesario descargar e instalar los paquetes que las contienen. Esto se realiza a partir de la función “install.packages()”. En este caso es necesario instalar 4 paquetes que permiten trabajar con datos en formato ráster, utilizar herramientas de percepción remota y exportar archivos en formato ráster.</p>
<pre>library(RStoolbox) library(raster) library(rgdal) library(e1071)</pre>	<p>La función “library()” permite cargar los paquetes. Cada vez que se necesitan, se debe utilizar esta función para hacer uso de las herramientas.</p>
<pre>setwd("C:/Users/monse/Desktop/IMAGEN_LANDSAT")</pre>	<p>Con la función “setwd()” se indica el espacio donde se desea guardar la información. Dentro de ella se debe colocar la dirección de la carpeta.</p>
<pre>Metadata_file &lt;- "LC08_L1TP_015053_202002 04_20200211_01_T1_MTL.txt "</pre>	<p>La función “&lt;-” permite nombrar una variable. <i>Metadata_file</i> corresponde al nombre de la variable, en este caso los metadatos de la imagen satelital (se debe utilizar el nombre del archivo de metadatos, seguido de .txt). De esta forma es posible cargar la imagen al entorno.</p>
<pre>imagen &lt;- stackMeta(Metadata_file,quant</pre>	<p>Por medio de la función “stackMeta()” se indica a qué tipo de banda corresponde. Para ello se debe indicar la entrada</p>

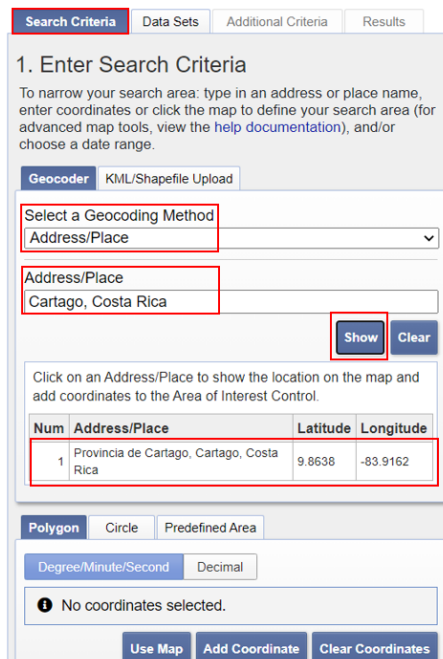
<pre>ity = "dn") pan &lt;- stackMeta(Metadata_file,quantity = "dn",category="pan") qa &lt;- stackMeta(Metadata_file,category="qa")</pre>	<p>“quantity” (“dn”= bandas 30m; “dn”,category=“pan”= banda pancromática; category=“qa”= calidad)</p>
<pre>ggRGB(imagen,r=5,g=4,b=3,stretch = "lin")</pre>	<p>La función “ggRGB()” permite visualizar la imagen según el formato que se indica. La combinación de bandas 5,4,3 corresponde a la imagen infrarrojo.</p>
<pre>imagen_co &lt;- radCor(imagen,metaData = Metadata_file,method = "apref")</pre>	<p>Al ser una imagen satelital, es necesario realizar una corrección atmosférica. Esta se hace con la función “radCor()”.</p>
<pre>ggRGB(imagen_co,r=5,g=4,b=3,stretch = "lin")</pre>	<p>Permite visualizar la imagen después de realizar la corrección atmosférica.</p>
<pre>ext &lt;- extent(840000,855000,1086000,1105600)</pre>	<p>La función “extent()” realiza un zoom según el área indicada en las coordenadas. Es importante mantener el orden de las coordenadas (X menor, X mayor, Y menor, Y mayor).</p>
<pre>ggRGB(imagen_co,r=5,g=4,b=3,stretch="lin",ext=ext)</pre>	<p>Permite visualizar el zoom.</p>
<pre>subcuenca_area &lt;- crop(imagen_co,ext)</pre>	<p>LA función “crop()” corta la imagen satelital según la extensión del zoom que se indicó en los pasos anteriores.</p>

<pre>campos &lt;- readOGR(".", "campos_entrenamiento_2")</pre>	<p>La función “readOGR()” permite cargar un archivo shape con los campos de entrenamiento.</p>
<pre>clas_sup &lt;- superClass(subcuenca_area, trainData = campos, responseCol = "Clase", model="mlc")</pre>	<p>La función “superClass()” realiza la clasificación supervisada. La entrada "responsecol" es el nombre que tiene la columna con las coberturas en la tabla de atributos, de la capa con las áreas de entrenamiento.</p>
<pre>ggR(clas_sup\$map, geom_raster = TRUE, forceCat = TRUE)</pre>	<p>Permite tener una visualización de la clasificación.</p>
<pre>saveRSTBX(clas_sup, filename = "clasificacion_super.tiff", format = "raster")</pre>	<p>Se utiliza la función “saveRSTBX()” para guardar la clasificación en un archivo ráster, en el directorio especificado antes.</p>

#### Anexo 4. Tutorial de descarga de una imagen Landsat.

Las imágenes Landsat se pueden obtener por medio de la interfaz de Earth Explorer desarrollada por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). Para Descargar la imagen se debe ingresar al enlace <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Posteriormente, se debe registrar como usuario para poder descargar imágenes del sitio y seguidamente se debe dirigir al correo electrónico para confirmar la cuenta. Al iniciar sesión, se debe seguir los siguientes pasos:

A. En la pantalla se desplegará la ventana donde se deben definir los criterios de búsqueda de la imagen. En la pestaña “*Search Criteria*” se debe realizar la búsqueda del área en la que se tiene interés. Para ello se muestra la opción “*Address/Place*” donde podrá indicar el nombre del sitio. Al seleccionar “*Show*” se desplegarán los resultados de la búsqueda y al seleccionar un resultado, tendrá una visualización preliminar del sitio que se indicó (Figura 1).



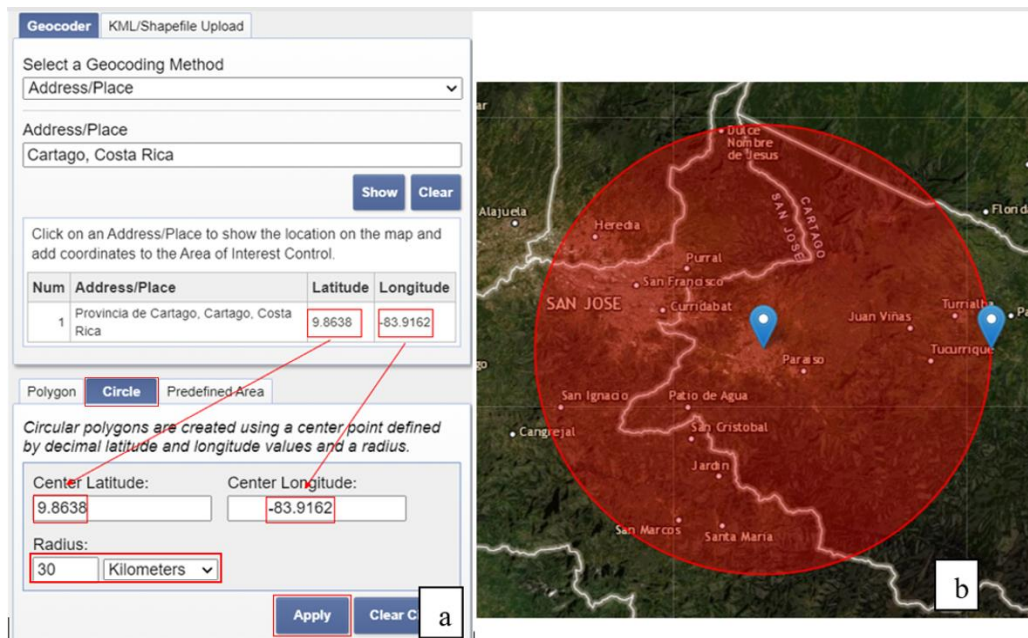
The screenshot shows the 'Search Criteria' tab of the Earth Explorer interface. It includes a 'Geocoder' section with a dropdown menu set to 'Address/Place' and a text input field containing 'Cartago, Costa Rica'. Below this is a table with one search result. At the bottom, there is a 'Polygon' section with a 'No coordinates selected' message and buttons for 'Use Map', 'Add Coordinate', and 'Clear Coordinates'.

Num	Address/Place	Latitude	Longitude
1	Provincia de Cartago, Cartago, Costa Rica	9.8638	-83.9162

**Figura 1.** Configuración de parámetros de búsqueda.

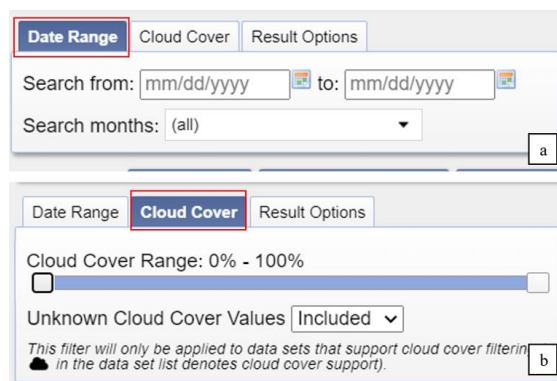
Posteriormente, en la pestaña de “*Circle*”, se deben copiar las coordenadas brindadas por la búsqueda, además se debe indicar un radio para ampliar el rango de búsqueda (Figura 2a). Al marcar la opción de “*Apply*” se podrá tener una vista preliminar del sitio indicado en la búsqueda (Figura 2b).





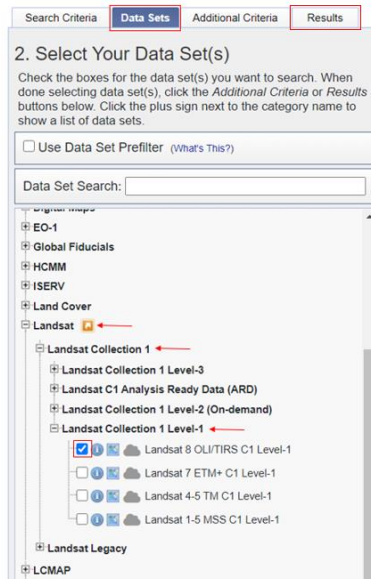
**Figura 2.** Selección del área de estudio.

**B.** Adicional, para generar un filtro de búsqueda y reducir la cantidad de resultados, en la parte inferior se muestran las opciones de “*Date Range*”, para introducir un rango de tiempo para realizar la búsqueda (Figura 3a). En la opción “*Cloud Cover*” se puede seleccionar el porcentaje de nubes que se desea en la imagen, lo ideal es que la imagen presente el menor porcentaje, sin embargo es posible que estas no estén ubicadas sobre el área en estudio (Figura 3b).




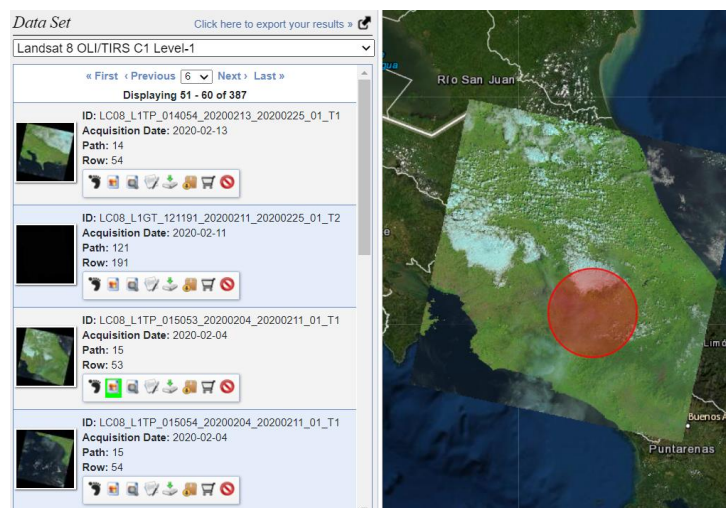
**Figura 3.** Filtros de búsqueda de imágenes.

C. Posteriormente en la pestaña “Data Sets” se desplegará una lista de las imágenes que proporciona la plataforma. Para descargar una imagen Landsat 8, se debe seleccionar la opción de “Landsat”, “Landsat Collection 1”, “Landsat Collection1 Level-1” y “Landsat 8 OLI/TIRS C1 Level-1” (Figura 4). Finalmente seleccionar “Results” para iniciar la búsqueda.




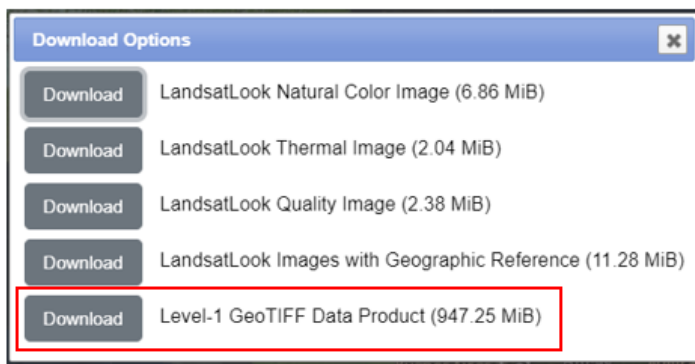
**Figura 4.** Selección de colección de imágenes Landsat 8.

D. Se desplegarán los resultados de búsqueda, al marcar la opción  se podrá visualizar la imagen y analizar si es adecuada, es importante visualizar varias imágenes antes de seleccionar la indicada (Figura 5).



**Figura 5.** Visualización de las imágenes Landsat 8.

Con la opción  podrá descargar la imagen deseada. En la pantalla se desplegará una ventana con las opciones de descarga, las primeras son solo imágenes con algunas bandas. La opción adecuada es la que tiene mayor peso o se encuentra en formato “GeoTIFF”. Esta contiene las bandas de 1 a la 11 y los metadatos de la imagen necesarios para diferentes procedimientos (Figura 6).



**Figura 6.** Opciones de descarga de imagen Landsat.

## **Anexo 5.** Guía de usuario para el cálculo de caudal máximo.

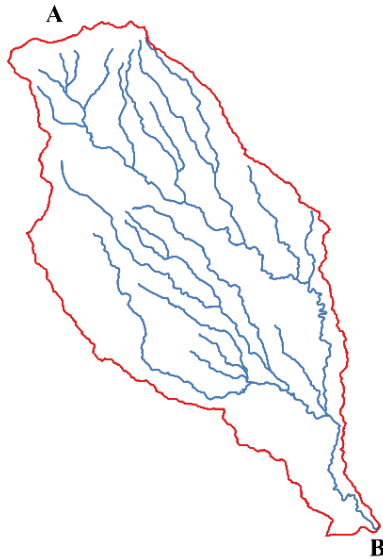
### **1. Esguurrimiento superficial**

El agua que llega a la superficie y cuerpos de agua por medio de la precipitación puede tomar varias vías, por un lado, una porción del agua se evapora por efecto de la energía térmica del sol. Otra parte de la precipitación es captada por las plantas y una última porción llega a la superficie. En esta el agua puede tomar varios caminos como quedar retenida en el suelo por infiltración, convertirse en agua subterránea o escurrir superficialmente (Maderey y Jiménez, 2005; Chang, 2012; Schulz y García, 2015).

El agua de lluvia que se infiltra y se mueve en la superficie terrestre se denomina escorrentía superficial. La estimación del escurrimiento superficial no es un valor constante, ya que tiende a variar con las intensidades de lluvia y las características que presente la cuenca, por lo tanto se hace una estimación es aproximada (Murillo, 2010). Este documento tiene como objetivo explicar los procedimientos básicos para el cálculo de caudales máximos y las variables asociadas, por medio de sistemas de información geográfica.

### **2. Determinación de caudal máximo**

El caudal máximo se refiere a la cantidad de agua que fluye en un río, después de experimentar un evento de crecida (Martín, 2003). Según la magnitud de este, puede generar cambios importantes en el cauce del río. Además, se encuentra altamente relacionado con otros factores como la intensidad de lluvia, el tiempo de duración de esta y a factores de la cuenca como el tipo de suelo, cobertura y área (Villón, 2004; Algeciras y Bermúdez, 2016). Durante los primeros minutos la precipitación que cae en la cuenca tiene una intensidad creciente, a partir de este tiempo, no se ha terminado de drenar toda la cuenca, por lo tanto el caudal que se presenta por el punto “B” es bajo. Posteriormente llegará un punto en el que el volumen que cae será equilibrado y a una menor intensidad, por lo cual el volumen que ingresa por unidad de tiempo gracias a la lluvia corresponde al caudal registrado en la salida de la cuenca, en el punto B (Figura 1) (Aparicio, 1992).



**Figura 1.** Esquema de una cuenca hidrográfica para el cálculo de caudal.

La determinación del caudal máximo se realiza por medio del método racional (1).

$$Q = \frac{CIA}{360} \quad (1)$$

Donde:

$Q$ : caudal máximo ( $m^3/s$ )

$C$ : coeficiente de escorrentía

$I$ : intensidad máxima de la lluvia ( $mm/hr$ )

$A$ : área de la subcuenca ( $ha$ )

### **2.1. Tiempo de concentración**

Se denomina tiempo de concentración al tiempo que transcurre cuando la primera gota de lluvia cae en el punto más alejado de la cuenca, hasta que llega a la salida (Villón, 2004). Es decir, transite desde el punto “A” hasta “B” (Figura 1). Entre los aspectos que determinan el tiempo de concentración, se encuentra la pendiente y la longitud del drenaje (Gil, Volonté y Campo, 2019).

El método de racional para la determinación del caudal supone que la máxima escorrentía se da cuando esta es igual al tiempo de concentración (Villón, 2004). Por lo cual, es el tiempo mínimo en el que se drena toda la cuenca. El tiempo de concentración se calcula por medio de la ecuación (2). A partir de la capa de red hídrica se determinaron las variables necesarias para poder calcular el tiempo de concentración de cada una de las microcuencas. Para ello se determinó los valores de longitud y pendiente de cada uno de los drenajes presentes en la capa.

$$t_c = 0,0663 \left( \frac{L}{\sqrt{S_c}} \right)^{0,77} \quad (2)$$

Donde:

Tc: Tiempo de concentración (h).

L: Longitud del cauce principal en kilómetros (km).

Sc: Pendiente de la cuenca (%).

## 2.2.Intensidad de lluvia

Este es un parámetro basado en la observación de cantidad de milímetros (mm) llovidos en un tiempo determinado, generalmente en horas (h) (Gámez, 2010). La intensidad de la lluvia tiende a ser variable durante el periodo que llueve, esta al inicio puede tener una alta intensidad y a lo largo que el tiempo pasa, esta va disminuyendo (Bazzano, Heredia, Elías, Lamelas, y Forciniti, 2019).

Se determinó la intensidad de lluvia a partir de la ecuación (3), para poder aplicarla, es necesario realizar el cálculo de tiempo de concentración mostrado en el punto anterior, además tener el valor de intensidad de lluvia de 15 minutos de duración.

$$I = \left( 0,5 + \left( \frac{8,22}{2,6+tc} \right) \right) * I_{15} \quad (3)$$

Donde:

I: Intensidad de lluvia (mm/hr)

Tc: Tiempo de concentración (h)

I<sub>15</sub>:Intensidad de lluvia de 15 minutos de duración

Para obtener el valor de intensidad de lluvia para las subcuencas, se utilizaron los valores desarrollados por Gunther y Dercksen (1990) de las estaciones meteorológicas cercanas a las subcuencas (Cuadro 1). A partir de estos valores se generó una interpolación en el programa QGIS 3.10 y calcularon los valores promedio de intensidad de lluvia para cada una de las microcuencas.

**Cuadro 1.** Intensidades de lluvia de 15 minutos de duración para estaciones meteorológicas cercanas a las subcuencas Birrís y Páez.

<b>Código de estación</b>	<b>Nombre de estación</b>	<b>Intensidad para 15 minutos</b>
73081	Volcán Irazú	80,8
73011	Sanatorio Durán	88,0
73022	Pacayas	96,4
73003	Comandancia	163,6
73046	Cachí Plantel	119,6
73047	Tucurrique	120,4

### **2.3.Coeficiente de escurrimiento**

El coeficiente de escurrimiento o escorrentía representa la porción de la precipitación que realmente genera escorrentía superficial. Se encuentra relacionado a variables que determinan la infiltración del agua en el suelo, como la cobertura, pendiente, textura de suelo, entre otros (Ibañez, Moreno y Gisbert, 2007).

Los valores de escorrentía se determinaron de acuerdo con el cuadro desarrollado por McCuen (1998). Este relaciona las características del suelo, con la pendiente y cobertura presente en las microcuencas (Cuadro 2), para determinar el coeficiente de escorrentía, se tomó en cuenta solo las coberturas de bosque, cultivos, pastos y zona urbana, el uso del suelo de plantaciones se consideró como bosque.

**Cuadro 2.** Valores de coeficiente de escorrentía (C) en relación con la clasificación hidrológica de suelos del SCS y pendiente del terreno.

Uso del suelo	A			B			C			D		
	0-2%	2-6%	6%+	0-2%	2-6%	6%+	0-2%	2-6%	6%+	0-2%	2-6%	6%+
<b>Cultivado</b>	0,08	0,13	0,16	0,11	0,15	0,21	0,14	0,19	0,26	0,18	0,23	0,31
<b>Pastos</b>	0,12	0,20	0,30	0,18	0,28	0,37	0,24	0,34	0,44	0,30	0,40	0,50
<b>Bosques</b>	0,05	0,08	0,11	0,08	0,11	0,14	0,10	0,13	0,16	0,12	0,16	0,20
<b>Urbano</b>	0,25	0,28	0,31	0,27	0,30	0,35	0,30	0,33	0,38	0,33	0,36	0,42

Fuente: McCuen (1998)

Para determinar el grupo hidrológico (A, B, C y D), se utilizaron datos de textura de suelo determinados por Sandoval y Mata (2014). Se tomaron los valores de arena limo y arcilla para los puntos de muestro ubicados dentro de las subcuencas. Para cada uno de los puntos de muestreo se determinó el grupo hidrológico por medio del programa NumCur.

La determinación de la cobertura se llevó a cabo a partir de una capa de coberturas creada con una clasificación supervisada. Las coberturas utilizadas para realizar la clasificación fueron las más representativas de la zona: pastos, cultivos, bosque, plantaciones, urbano y cuerpos de agua. Para determinar el coeficiente de escorrentía, no se tomaron en cuenta las áreas con cuerpos de agua y en caso de las plantaciones, se consideraron como bosques.

El cálculo del coeficiente de escorrentía se realizó con el programa QGIS 3.10 por medio de operaciones ráster de las variables requeridas (cobertura, grupo hidrológico y pendiente). Para las microcuencas que presentaron más de un uso de suelo, pendiente y grupo hidrológico, se determinó con un promedio ponderado para obtener solo un valor de escorrentía para cada microcuenca.



## **2.4.Área drenada de microcuencas**

El área de la cuenca se refiere a la superficie de drenaje proyectada en un plano horizontal, delimitada por la divisoria de aguas (Villón, 2004). Este es un factor que ayuda a describir el comportamiento de escurrimiento en una cuenca, para cuencas de menor área se espera que el tiempo de concentración sea bajo, así como una mayor susceptibilidad para alcanzar caudales pico en menos tiempo (Esper y Perucca, 2014). El área drenada para cada una de las microcuencas se determinó con el programa QGIS 3.10. Para ello se generó una capa de microcuencas a partir de la capa de red hídrica y con el delimitador QSWAT+.1.2.2.

## Anexo 6. Secciones de metadatos de las capas desarrolladas para el Atlas Digital.

Variable	Identificación					Distribución Descripción	Representación espacial		
	Nombre de la capa	Fecha de creación	Tipo de representación espacial	Edición	Lenguaje de codificación		Resolución espacial	Escala	Tipo de objeto geométrico
Red hídrica	red_hidrica.shp	28-ago-20	Vector	Primera	UTF-8	Representa el sistema de drenajes permanentes dentro de las subcuencas para el año 2020.	NA	2500	Lineas
MED	med.TIFF	4-ago-20	Raster	Primera	UTF-8	Esta capa muestra las variaciones de elevación de los diferentes puntos en las subcuencas.	12,5 metros	NA	NA
Subcuencas	subcuencas.shp		Vector	Primera	UTF-8	Muestra la delimitación de las subcuencas Birris, Pérez y subcuencas ubicadas en medio.	NA	NA	Poligonos
Microcuencas	microcuencas.shp	26-oct-20	Vector	Primera	UTF-8	Representa la delimitación de cada una de las microcuencas de acuerdo con la capa de red hídrica.	NA	NA	Poligonos
Cantones	cantones.shp	21-oct-20	Vector	Primera	UTF-8	En esta capa se observa parte de los cantones de Oreamuno, Alvarado, Paraiso y Vázquez de Coronado.	NA	NA	Poligonos
Distritos	distritos.shp	21-oct-20	Vector	Primera	UTF-8	En esta capa contiene los distritos de los cantones, ubicados dentro de las subcuencas, estos son Potrero Cerrado, Paraiso, Llanos de Santa Lucía, Cot, Cachi, San Rafael, Pacayas, Capellades, Santa Rosa, Santiago, Cipreses, Cervantes y Cascajal.	NA	NA	Poligonos

**Figura 1.** Sección de metadatos correspondiente a la identificación, distribución y representación espacial.

Variable	Sistema de referencia		Calidad del dato		Metadatos			Resumen gráfico	
	Sistema de proyección	Código	Otros aspectos de mención	Nivel de jerarquía	Lenguaje de los metadatos	Lenguaje de codificación del metadato	Estandar del metadato	Nombre del archivo	
Red hídrica	Proyección Transversal del Mercator para Costa Rica	CTM.05, EPSG:5367	El datum vertical es el nivel medio del mar y el datum horizontal es el CR05 enlazado al Marco Internacional de Referencia Terrestre (ITRF2000) del Servicio Internacional de Rotación de la Tierra (IERS), para la época de medición 2005, 83 y asociado al elipsoide del Sistema Geodésico Mundial (WGS84).	Atributo	Los datos provienen de la digitalización de las capas IGN Cartografía 1:25mil disponible en el SNTI y rios1:50mil del Atlas Digital de Costa Rica.	Español	UTF-8	ISO 19115:2014	
MED	Proyección Transversal del Mercator para Costa Rica	CTM.05, EPSG:5367	El datum vertical es el nivel medio del mar y el datum horizontal es el CR05 enlazado al Marco Internacional de Referencia Terrestre (ITRF2000) del Servicio Internacional de Rotación de la Tierra (IERS), para la época de medición 2005, 83 y asociado al elipsoide del Sistema Geodésico Mundial (WGS84).	Módulo	La capa proviene de la base de datos Alaska Satellite Facility, con un recorte con la capa de subcuencas.	Español	UTF-8	ISO 19115:2014	
Subcuencas	Proyección Transversal del Mercator para Costa Rica	CTM.05, EPSG:5367	El datum vertical es el nivel medio del mar y el datum horizontal es el CR05 enlazado al Marco Internacional de Referencia Terrestre (ITRF2000) del Servicio Internacional de Rotación de la Tierra (IERS), para la época de medición 2005, 83 y asociado al elipsoide del Sistema Geodésico Mundial (WGS84).	Conjunto de datos	Proviene del delimitador automático QSWAT+. Se utilizó la capa de red hídrica y un modelo de elevación digital, ambos contenidos en la base de datos.	Español	UTF-8	ISO 19115:2014	
Microcuencas	Proyección Transversal del Mercator para Costa Rica	CTM.05, EPSG:5367	El datum vertical es el nivel medio del mar y el datum horizontal es el CR05 enlazado al Marco Internacional de Referencia Terrestre (ITRF2000) del Servicio Internacional de Rotación de la Tierra (IERS), para la época de medición 2005, 83 y asociado al elipsoide del Sistema Geodésico Mundial (WGS84).	Conjunto de datos	Proviene del delimitador automático QSWAT+. Se utilizó la capa de red hídrica y un modelo de elevación digital, ambos contenidos en la base de datos.	Español	UTF-8	ISO 19115:2014	
Cantones	Proyección Transversal del Mercator para Costa Rica	CTM.05, EPSG:5367	El datum vertical es el nivel medio del mar y el datum horizontal es el CR05 enlazado al Marco Internacional de Referencia Terrestre (ITRF2000) del Servicio Internacional de Rotación de la Tierra (IERS), para la época de medición 2005, 83 y asociado al elipsoide del Sistema Geodésico Mundial (WGS84).	Clase de objetos	Los datos provienen del Atlas Digital de Costa Rica 2014 mediante un recorte con la capa de subcuencas.	Español	UTF-8	ISO 19115:2014	
Distritos	Proyección Transversal del Mercator para Costa Rica	CTM.05, EPSG:5367	El datum vertical es el nivel medio del mar y el datum horizontal es el CR05 enlazado al Marco Internacional de Referencia Terrestre (ITRF2000) del Servicio Internacional de Rotación de la Tierra (IERS), para la época de medición 2005, 83 y asociado al elipsoide del Sistema Geodésico Mundial (WGS84).	Clase de objetos	Los datos provienen del Atlas Digital de Costa Rica 2014 mediante un recorte con la capa de subcuencas.	Español	UTF-8	ISO 19115:2014	

**Figura 2.** Sección de metadatos correspondiente a al sistema de referencia, calidad del dato, metadato y resumen gráfico.