

CAPÍTULO 1:

GENERALIDADES

1.1 Introducción

La determinación de escurrimientos de aguas superficiales reviste una gran importancia desde el punto de vista ingenieril como social y económico. Para el diseño adecuado de estructuras de aprovechamiento y control del recurso hídrico, es fundamental conocer la magnitud y extensión de estos escurrimientos.

Existen varios métodos internacionales para el cálculo del escurrimiento producido por eventos de precipitación, algunos basados en simples correlaciones y otros más sofisticados que toman en cuenta la interacción de los diferentes componentes del sistema natural. Un método que ha encontrado bastante aceptación, por su simplicidad y mediano requerimiento de información es el propuesto por el Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS acrónimo en inglés de Natural Resources Conservation Service) del Departamento de Agricultura de Estados Unidos.

“La escorrentía superficial es el fenómeno de mayor importancia desde el punto de vista de la ingeniería hidrológica y consiste en la ocurrencia y conducción de agua en la superficie terrestre” (Monsalve, 1999 citado por Prieto Villarroya et al. 2013, pág. 1).

La metodología del Número de Curva (CN) elaborada por el Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS) del Departamento de Agricultura de Estados Unidos, que se utiliza para determinar la escorrentía superficial, es un método aplicado cuando se desea obtener una adecuada aproximación (Monsalve, 1999; SCS, 1972 citado por Prieto Villarroya et al. 2013, pág. 1).

Las razones principales para el uso generalizado del método son:

- Aplicabilidad y eficacia aceptadas, debido al hecho de tratarse de un método ampliamente conocido y de uso habitual.
- Requiere un reducido número de variables para su aplicación, y estas son relativamente fáciles de obtener.
- Aunque utiliza pocos parámetros, los resultados son similares y coherentes con otros modelos de mayor complejidad.

El método del número de curva se emplea en todo tipo de cálculos hidrológicos, especialmente en cuencas sin aforar (Rallison & Millar, 1982 citado por Prieto Villarroya et al. 2013, pág. 1).

No obstante, la determinación práctica del parámetro del número de curva en Tarija se realiza en ocasiones de manera un tanto “artesanal”, con fuentes de datos poco rigurosas o actualizadas y bajo una cierta subjetividad. Por ello, se propone la aplicación de una metodología que apoyada en el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), permita el cálculo del CN de manera casi automatizada y mediante el uso de fuentes de datos actualizadas y de libre difusión.

Este método es la consolidación de diversos procedimientos y se aplica principalmente en los estudios de avenidas máximas en cuencas sin aforos, lo cual es muy apropiado para su aplicación en las cuencas del país por la inexistencia, en la mayoría de ellas, de dichos aforos.

1.2 Antecedentes

En una cuenca hidrográfica, solo una parte de la precipitación total se convierte directamente en escorrentía. Gran parte de esta precipitación se pierde debido a la capacidad de infiltración del suelo, la evaporación desde el suelo, la transpiración de las plantas y la retención de la precipitación por los bosques, charcos, entre otros. En conjunto, la suma total de las precipitaciones retenidas se conoce como abstracciones.

Cuando se trabaja con superficies extensas, como las cuencas hidrográficas, evaluar individualmente cada componente de las abstracciones resulta tedioso o incluso imposible. Por esta razón, existen métodos empíricos ampliamente utilizados para estimar el total de las abstracciones durante una tormenta. El método más difundido para obtener estas abstracciones es el desarrollado por el Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS acrónimo en inglés de Natural Resources Conservation Service) del Departamento de Agricultura de Estados Unidos. Este método es muy sencillo y se basa en consideraciones teóricas derivadas de más de 1000 cuencas experimentales recolectadas en la década de los 50. El método fue rápidamente adoptado a nivel internacional y se convirtió en un estándar para calcular las abstracciones en las cuencas hidrográficas.

Dado la importancia de este método, es necesario determinar los usos del suelo y grupos hidrológicos del suelo presentes en toda la cuenca hidrográfica, asignándoles un número adimensional denominado Número de Curva (CN, por sus siglas en inglés, Curve Number). Este parámetro es altamente sensible y determinante para calcular la precipitación efectiva.

Antes de la implementación de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), la obtención del número de curva se realizaba mediante calibración (prueba y error), requiriendo registros directos de tormentas y sus correspondientes hidrogramas de diseño. Esto hacía que obtener este valor fuera imposible sin contar con dichos registros. Sin embargo, con la disponibilidad de fotografías satelitales de todo el mundo y el uso de principios básicos de teledetección y SIG, ahora se dispone de una nueva alternativa para estimar el número de curva en cuencas hidrográficas, sin importar su extensión. Esto evita, en muchos casos, la necesidad de contar con registros de tormentas y sus respectivos hidrogramas de diseño.

El método de pérdida del número de curva, desarrollado por el Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS) del Departamento de Agricultura de Estados Unidos, puede calcularse de manera manual mediante el uso de fórmulas y utilizando sistemas de información geográfica para obtener los volúmenes de esorrentía de una cuenca. Existen otros métodos de pérdida que requieren estudios previos a detalle, tales como:

1. Green and Ampt
2. Initial and constant (inicial y constante) o método de pérdida $I_a - C$
3. Linear Déficit and Constant (LDC) (lineal de déficit y constante)
4. Smith Parlange
5. Soil Moisture Acoounting (SMAC) (cuenta de humedad del suelo)

1.3 Planteamiento del problema

En la presente investigación se pretende obtener el número de curva a partir del análisis de fotografías o imágenes de satélite (World Imagery), mediante la identificación de la vegetación y su procesamiento utilizando sistemas de información geográfica (ArcGIS, Erdas Imagine e Idrisi). Estos resultados serán contrastados con los valores determinados en estudios a nivel de expedientes técnicos de proyectos locales.

No obstante, surge un inconveniente al intentar obtener las superficies asignadas a cada grupo hidrológico del suelo en la cuenca hidrográfica delimitada, ya que esta, siempre abarca una extensa área. Realizar un estudio adecuado e identificar la superficie de la cuenca asociada a cada grupo hidrológico del suelo requiere un considerable tiempo y esfuerzo. Por esta razón, los estudios a nivel de expedientes técnicos llevados a cabo por instituciones estatales, como los gobiernos regionales y las municipalidades, estiman estos parámetros a conveniencia del especialista, basándose únicamente en su experiencia empírica.

La importancia de estudiar la cuenca del río Pajonal, radica que en el cierre o próximo a esté se encuentra la población de Entre Ríos y dentro de la cuenca se encuentra la Población del Pajonal, Narváz y otros, y la gran cantidad de cultivos en las riberas del río del mismo nombre.

1.4 Formulación del problema

¿De qué manera se puede calcular el número de curva en una cuenca hidrográfica a partir de registros de imágenes obtenidas mediante percepción remota?

1.5 Sistematización del problema

1. ¿Es posible utilizar una aplicación de SIG, con capacidades para el tratamiento de sistemas de información geográfica y dinamizar la obtención del número de curva y otras variables de la cuenca (morfometría)?
2. ¿Cuáles son las ventajas y las facilidades de las imágenes de satélite de alta resolución frente a otras imágenes (LANDSAT), en la creación de mapas de uso de suelos y grupos hidrológicos del suelo?
3. ¿Es posible relacionar el uso de los suelos, grupos hidrológicos del suelo, y pendientes de una cuenca hidrográfica para obtener el CN?

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo general

- Determinar el número de curva en la cuenca hidrográfica del río Pajonal (afluente del río Salinas) a partir de registros obtenidos mediante percepción remota (teledetección) y visitas de campo a través del uso de Sistemas de Información

Geográfica (SIG), para el cálculo futuro de los volúmenes de escorrentía de la cuenca.

1.6.2 Objetivos específicos

- Aplicar sistemas de información geográfica para el tratamiento de la información (imágenes de satélite y modelos digitales de elevación) en la cuenca en estudio, con el fin de generar datos detallados que faciliten la obtención del número de curva.
- Analizar las imágenes de satélite (World Imagery) de alta resolución para la identificación detallada del uso de suelos y grupos hidrológicos del suelo en la cuenca, complementado con visitas de campo. Este enfoque permitirá elaborar mapas temáticos precisos sobre el uso de suelos y grupos hidrológicos del suelo presentes en la cuenca.
- Analizar y comparar los resultados obtenidos del número de curva a partir del mapa final en formato ráster, con el objetivo de utilizar este coeficiente como información válida para la cuenca.

1.7 Justificación

1.7.1 Justificación teórica

En la hidrología superficial, especialmente en la determinación de la precipitación efectiva durante una tormenta, es crucial estimar las pérdidas de la precipitación total ocurridas en la cuenca hidrográfica. Uno de los métodos utilizados para estimar estas pérdidas es el método empírico creado por el Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS) del Departamento de Agricultura de Estados Unidos. Este método relaciona la pérdida de la precipitación con las abstracciones presentes en la cuenca hidrográfica, que incluyen la infiltración, evaporación, transpiración, retenciones, entre otros procesos.

La abstracción total de la precipitación se define en función de la clasificación del grupo hidrológico del suelo y del uso del suelo, a los cuales se les asigna un Número de Curva (CN) que varía de 1 a 100. Un CN de 100 representa un suelo totalmente impermeable donde toda la precipitación se convierte en escorrentía, mientras que un CN de 1 representa un suelo con una abstracción total, sin escorrentía.

¿Por qué se efectúa la investigación?: La investigación se llevó a cabo porque existe la necesidad de contar con un procedimiento que estime de manera precisa el número de curva en cuencas hidrográficas, evitando suposiciones basadas únicamente en la experiencia individual de cada especialista en hidrología.

¿Para qué se realiza la investigación?: Para obtener un número de curva ponderado para una cuenca hidrográfica, basado en la relación entre los grupos hidrológico del suelo y los usos del suelo.

1.7.2 Justificación metodológica

El inconveniente surge al intentar obtener las superficies destinadas para cada grupo hidrológico del suelo en la cuenca hidrográfica delimitada, siendo esta siempre una superficie extensa. Realizar un estudio adecuado e identificar la superficie de la cuenca asociada a cada grupo hidrológico del suelo requiere considerable tiempo y esfuerzo. Por esta razón, resulta indispensable el uso de programas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) que faciliten el cálculo de estas variables.

Desde el punto de vista técnico, la investigación implementó una metodología para la obtención del número de curva en una cuenca hidrográfica que no cuenta con aforos. Esto se logró mediante el análisis de fotografías satelitales y su procesamiento mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG).

1.7.3 Justificación práctica

La falta de registros de tormentas y sus correspondientes hidrogramas de diseño, así como la variabilidad en la orografía de la gran mayoría de las cuencas debido a su extensión, generan incertidumbre y limitaciones en la obtención del número de curva en los proyectos de aprovechamiento hídrico. A su vez, esto representa una restricción en la formulación de proyectos hídricos destinados a proteger cultivos y poblaciones contra crecidas y eventos extremos de precipitación.

Por esta razón, se buscó determinar el número de curva en una cuenca hidrográfica utilizando las alternativas que ofrecen los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la percepción remota a través de la teledetección. Estas herramientas permiten abordar este desafío y superar las limitaciones asociadas, brindando una opción prometedora para

obtener información precisa y confiable sobre el número de curva en las cuencas hidrográficas.

Este enfoque tiene una gran relevancia social, especialmente en el departamento de Tarija y en el país, donde en los últimos años se ha impulsado el aprovechamiento de los recursos hídricos mediante la construcción de proyectos de irrigación, consumo de agua potable, infraestructuras viales, entre otros. Para llevar a cabo estos proyectos de manera adecuada, es fundamental obtener de forma precisa el número de curva para determinar los caudales máximos en proyectos específicos. Un número de curva que represente correctamente el comportamiento de los caudales en la cuenca hidrográfica permitirá un diseño adecuado de las obras civiles y estructuras hidráulicas, garantizando así una utilización eficiente de los presupuestos asignados.

Beneficios que se derivan: Esta investigación proporciona la estimación de un parámetro crucial en la transformación de la lluvia en escorrentía: el número de curva. Esto se logra mediante el uso de fotografías satelitales obtenidas de diferentes satélites y el empleo de programas para el análisis de sistemas de información geográfica (SIG).

1.8 Variables e indicadores

Las variables e indicadores identificadas para el desarrollo del presente trabajo de investigación se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 1. Variables e indicadores identificados para el trabajo de investigación

VARIABLES	Directas	Directas	INDICADORES
	Uso de suelos	Identificación y delimitación del uso de suelos con características únicas y similares.	
	Grupos hidrológicos del suelo	Identificación y delimitación de los suelos con características propias y similares.	
	Indirectas	Indirectas	
	Número de curva	Valor asignado a cada grupo hidrológico del suelo y de uso de suelos	
	Intervinientes	Intervinientes	
Cuenca hidrográfica	Delimitación de la cuenca: superficie, perímetro, ubicación de la cuenca.		

Fuente: Elaboración propia.

1.9 Metodología y plan de trabajo

En la actualidad, el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) ha demostrado ser una herramienta valiosa en diversos campos de estudio, especialmente en la hidrología. En el marco de este trabajo de investigación, se adoptó un enfoque cuantitativo.

El plan de trabajo comenzó con la recopilación detallada de información relevante sobre la cuenca del río Pajonal. Se recopilaron datos importantes del municipio y la sub gobernación de Entre Ríos, como el Plan de Desarrollo Municipal (PDM), el Plan Territorial de Desarrollo Integral (PTDI) y otros documentos. Esta documentación permitió obtener detalles sobre aspectos como la red de carreteras, las poblaciones, las estaciones climáticas, los ríos más importantes, el tipo de vegetación, los cultivos, entre otros.

Posteriormente, se obtuvieron imágenes de satélite y Modelos Digitales de Elevación (DEM) de diferentes servidores. Utilizando los modelos digitales de elevación, se delineó la cuenca de estudio siguiendo las directrices del Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMyA), y se ajustó el área y el perímetro utilizando la imagen de satélite. Dado que el área de trabajo era extensa y la cuenca estaba compuesta por varios bloques de datos ráster (DEM e imagen de satélite), se utilizó el software "Erdas Imagine" para crear el mosaico general de la cuenca. Este paso fue crucial para uniformizar el color de la imagen de satélite en su totalidad y corregir posibles errores de proyección presentes en los bloques individuales.

Una vez creado el mosaico general de la cuenca, se utilizó el software "ArcGIS" para generar diferentes tipos de entidades, como cuencas, ríos, poblaciones, carreteras, cultivos, suelos, entre otros. Todos estos elementos espaciales se administraron en una base de datos con la proyección correspondiente (UTM WGS 84 Zona 20 Sur).

Para calcular la morfometría de toda la cuenca, se utilizó el software "IDRISI". Este software utilizó el modelo digital de elevación como entrada para obtener datos morfométricos, tales como los tiempos de concentración, la curva hipsométrica, el trayecto del cauce más largo, la pendiente media de la cuenca, entre otros. Estos resultados también se refinaron utilizando el software "ArcGIS".

1.10 Hipótesis

El uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), generan información dinámica para describir con eficiencia las características de la cuenca y la estimación del valor aproximado del número de curva de manera sencilla y rápida para los diversos tipos y extensiones de una cuenca hidrográfica, como es el caso de la cuenca del río Pajonal.

CAPÍTULO 2:

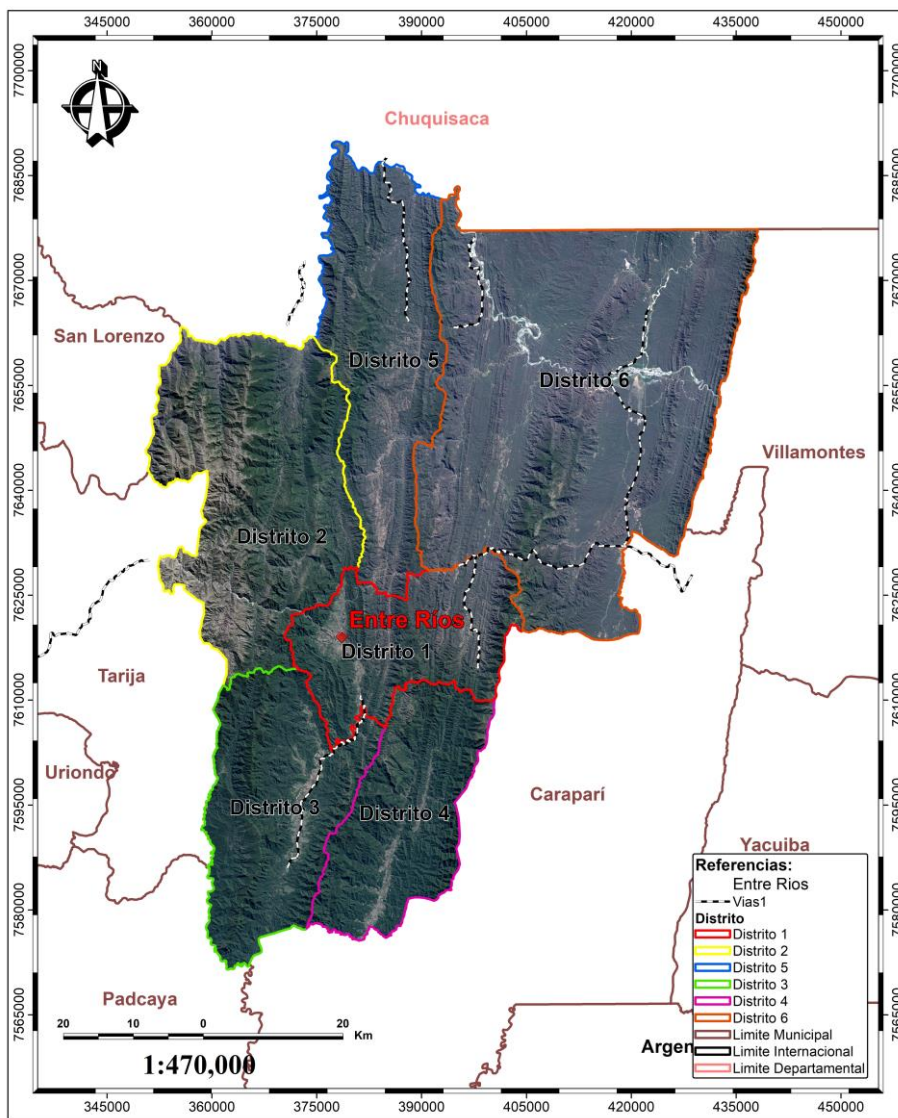
MARCO TEÓRICO

2.1 Marco espacial

2.1.1 Ubicación administrativa

La cuenca hidrográfica se encuentra en el departamento de Tarija en el municipio de Entre Ríos, primera y única sección de la Provincia O'Connor, ubicado en la parte central del departamento de Tarija, en la región que conforma el piso ecológico que se denomina SUBANDINO, a 108 km de la ciudad capital, está entre las coordenadas: 20°51'57" y 21°56'51" de latitud Sud, 63°40'23" y 64°25'6" de longitud Oeste. El centro poblado de Entre Ríos, se encuentra a 1.232 m.s.n.m.

Mapa 1. Mapa político de Entre Ríos



Fuente: Plan Territorial de Desarrollo Integral para vivir bien del municipio de Entre Ríos, 2021-2025

2.2 Marco temporal

En este trabajo de investigación se utilizó información de la versión original del Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS), correspondientes a la última revisión del año 2009, para la obtención del número de curva.

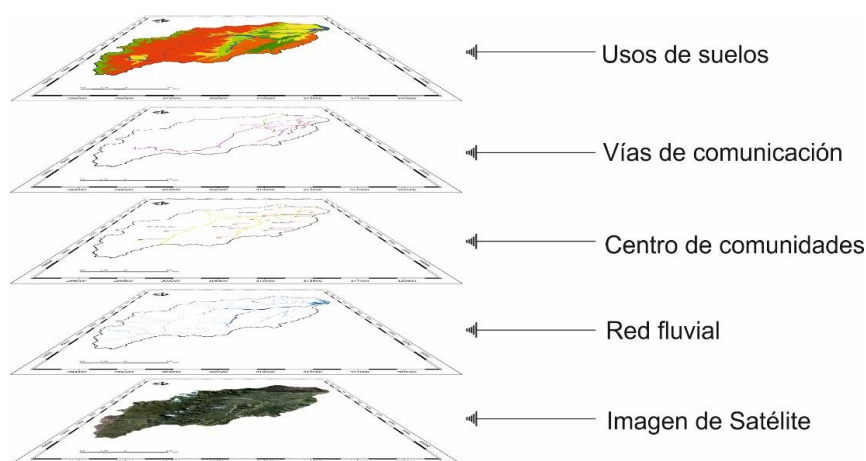
2.3 Marco conceptual

2.3.1 Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Existen múltiples definiciones sobre qué es un SIG. Aunque algunas de ellas son más completas que otras, todas coinciden en resaltar dos características básicas del SIG:

- Un SIG es un sistema gestor de bases de datos, y como tal, debe tener todas las herramientas que poseen las bases de datos convencionales. Pero además de aquéllas, debe poseer igualmente herramientas específicas de gestión de base de datos ordenadas geográficamente (es decir, georreferenciadas).
- Un SIG almacena y relaciona datos espaciales (posición o localización) con datos temáticos (atributos alfanuméricos) distribuidos en capas o coberturas. En la figura 1 se muestra un esquema explicativo de la organización de la información temática en capas.

Figura 1. Representación de un SIG mediante capas de información temática.



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con lo anterior, una de las definiciones más simples que podría hacerse de un SIG es que constituye un potente conjunto de herramientas para la recogida, almacenamiento, extracción, análisis y visualización de información geográfica

procedente del mundo real (Burrough, 1986 citado por Nagata Shimabuku, 1996, pág. 165). Esta es, sin ninguna duda, una definición que muestra el origen del SIG como la integración de los programas de diseño asistido por ordenador (CAD) con las utilidades de gestión de cartografía digital y su relación con el software de gestión de bases de datos.

La diferencia entre las múltiples soluciones comerciales del SIG radica, por una parte, en el tipo de datos espaciales que manejan, y por otra en la manera en que esos datos se almacenan y se relacionan con atributos.

También es posible entender un SIG como una filosofía de gestión. En definitiva, se trata de centrar la definición en la finalidad de estos sistemas, y no en los medios o herramientas utilizados para alcanzarla. En este caso, podría ser una forma de tomar decisiones dentro de una organización basada en información que se gestiona de manera centralizada, pero ordenada dependiendo de su localización geográfica.

Por último, una definición más global, podría distinguir en el concepto de SIG, tres componentes conectados entre sí:

- Un conjunto de datos ordenados dependiendo de su localización geográfica. Esto es lo que se conoce como una base de datos georreferenciada.
- Equipos y software para gestionar y relacionar los datos. En este caso, ese papel lo realiza el Sistema Gestor de Bases de Datos Georreferenciadas o, simplemente, SGBDG.
- Un problema específico u objetivo que se intenta resolver de los datos espacialmente distribuidos, con la ayuda de las herramientas disponibles (denominadas aplicaciones o funcionalidades del SIG).

En este punto conviene hacer una distinción entre lo que es el SIG en su conjunto, tal y como se acaba de definir, y lo que es el software utilizado para la gestión de datos georreferenciados. En un SIG, la pieza fundamental es la que se ha enunciado en primer lugar, esto es, el conjunto de datos ordenados espacialmente. A partir de este conjunto de datos se construyen una serie de herramientas de gestión y consulta de estos datos. Estas herramientas es posible encontrarlas comercialmente en distintos paquetes o softwares conocidos como Sistemas de Gestión de Bases de Datos Georreferenciadas (SGBDG).

Estos softwares además suelen incluir herramientas de personalización o programación de tareas específicas para cada uso.

Como conclusión, se puede decir que un SIG es una base de datos georreferenciada, esto es, una base de datos en la cual los datos se localizan por medio de coordenadas geográficas con respecto a algún sistema de referencia. Esta es la principal diferencia entre un software de SIG y uno de CAD (Rossiter, 1994 citado por Martínez Solano, 2002, pág. 25 y 26).

2.3.1.1 Aplicaciones a usar

Para obtener el número de curva de la cuenca del río Pajonal, se usaron tres softwares muy difundidos en los SIG y la extensión HEC-GeoHMS desarrollado por la USACE (United States Army Corps Engineers)

- **ArcGIS** es un completo sistema que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica. Es la plataforma líder mundial para crear y utilizar Sistemas de Información Geográfica (SIG), utilizada por todo el mundo para poner el conocimiento geográfico al servicio de los sectores del gobierno, las empresas, la ciencia, la educación y los medios. ArcGIS permite publicar la información geográfica para que esté accesible para cualquier usuario. En general, se utiliza ArcGIS porque permite:
 - ✓ Resolver problemas.
 - ✓ Tomar mejores decisiones.
 - ✓ Planificar adecuadamente.
 - ✓ Utilizar los recursos más eficientemente.
 - ✓ Anticipar y administrar los cambios.
 - ✓ Administrar y ejecutar las operaciones de forma más eficaz.
 - ✓ Comunicar de forma más efectiva.
- **Erdas Imagine** es un software que se utiliza para trabajar con imágenes de satélite y fotografías aéreas. Esta herramienta presenta unas capacidades muy potentes para el procesamiento, análisis e interpretación de información ráster, así como

trabajar con datos vectoriales. Las principales ventajas que presenta el software Erdas Imagine son:

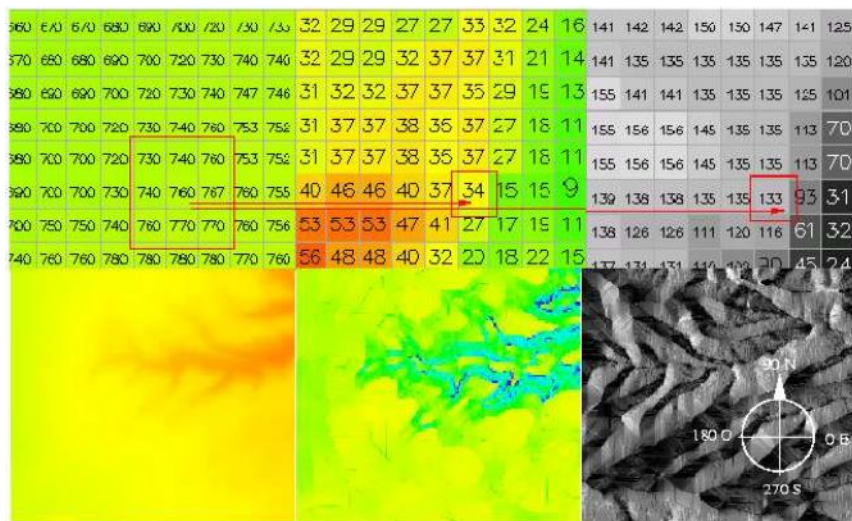
- ✓ Procesamiento rápido de imágenes de satélite: Este software está especialmente diseñado para extraer información de imágenes de manera eficiente.
 - ✓ Compatibilidad con diferentes formatos de base de datos.
 - ✓ Compatible con más de 200 formatos de imágenes, incluyendo GeoTIDD, NITF, CADRG, JPEG, JPEF2000, ECW y MrSID. Su extensión principal de archivo es el .img
 - ✓ Compatible con imágenes capturadas por la mayoría de los satélites.
- **Idrisi** se destaca por su amplia funcionalidad analítica de rasters y su capacidad para abordar una variedad de requisitos en SIG y sensores remotos. Cubre desde la incertidumbre en las bases de datos y la modelación espacial hasta la mejora y clasificación de imágenes. Además, ofrece utilidades especializadas para el monitoreo ambiental y el manejo de recursos naturales, así como el análisis de cambios y series de tiempo, apoyo a la toma de decisiones basadas en múltiples criterios y objetivos, análisis de incertidumbre, modelos de simulación, interpolación de superficies y la caracterización de estadísticas. A pesar de la naturaleza altamente sofisticada de estas utilidades, el sistema “Idrisi” es versátil de usar y manejar.
- **HEC-GeoHMS** asiste en la estimación de parámetros de hidrología. Esta extensión contiene herramientas para crear un ráster de número de curva. La herramienta “Generate CN Grid” es útil para crear ráster de número de curva. Para usar esta herramienta se debe crear una capa de polígono que agrupe ambos datos, uso de suelos y grupos hidrológicos del suelo.

2.3.1.2 Modelos Digitales de Elevación (MDE)

Un Modelo Digital de Elevación (DEM = Digital Elevation Model) es una representación en formato ráster de una superficie continua. Por lo general hace referencia a la superficie de la tierra, mediante un conjunto de puntos cuyos valores en X, Y y Z son conocidos y están definidos en un sistema de coordenadas arbitrario (Fallas, 2007 citado por Pucha-Cofrep et al. 2017, pág. 44).

Los siguientes enfoques o concepciones de los datos según su modo de almacenamiento no solo son aplicables para la recolección de elevaciones, como es el caso del MDE (Modelo Digital de Elevación), sino también para cualquier otra variable espacial que pueda dar lugar a la elaboración de algún tipo de cartografía.

Figura 2. Operador de vecindad, cálculo de pendientes y orientaciones



Fuente: Fundamentos de SIG - Aplicaciones con ArcGIS de Pucha-Cofrep et al, 2017

La información que se puede derivar a partir de los modelos digitales de elevación tiene aplicabilidad en diferentes campos, como la hidrología, análisis de riesgos, la planificación urbana, entre otros. Los principales productos que se pueden obtener de un DEM son: mapas de pendientes, curvas de nivel, mapa de relieve, mapa de visibilidad, mapa de aspecto, cuencas hidrográficas, cuencas visuales, etc.

Para calcular pendientes, altitudes, delinear la cuenca y determinar la morfometría de la cuenca se usó un modelo digital de elevación facilitado por el satélite “ALOS PALSAR” con un tamaño de pixel de 12.5 x 12.5 metros.

bordes o límites de los objetos del mapa geográfico, pero no sus contenidos interiores. La segunda diferencia es que sólo un valor de la variable considerada se almacena en cada objeto. Por ejemplo, supóngase que se tiene una red principal consistente en varias tuberías o segmentos con características homogéneas. En una estructura vectorial sólo se guardará un valor de estas características vinculado a una línea quebrada o polilínea que representará el trazado de las tuberías. Sin embargo, como se ha mencionado anteriormente, en el modelo ráster se guardará un valor de las características para cada una de las celdas por dónde pasa la tubería.

El modelo de datos vectorial se basa en el supuesto de que la superficie de la Tierra se compone de objetos discretos tales como árboles, ríos, lagunas, etc. En este modelo, no existen unidades fundamentales que dividen la zona recogida, sino que se recoge la variabilidad y características de esta mediante entidades geométricas. Para cada entidad geométrica las características son constantes. La forma de estas entidades se codifica de modo explícito, porque modeliza el espacio geográfico a través de una serie de primitivas geométricas que contienen los elementos más destacados de dicho espacio. Estas primitivas son de tres tipos: puntos, líneas y polígonos (ESRI, 2010; Olaya, 2014 citado por Pucha-Cofrep et al. 2017, pág. 10).

2.3.1.5 Representación de archivos ráster

El modelo ráster de representación de datos espaciales emula la realidad a través de la creación de una rejilla regular. En este modelo de datos, lo que se almacena de cada objeto es, no solo su contorno, sino su interior. Se suele aplicar una rejilla o cuadrícula en la cual cada celda tiene la misma forma y tamaño. De esta forma se obtiene una especie de matriz cuyas celdas almacenarán el valor que la variable elegida toma en ese punto. Esta variable almacenada puede ser cualitativa (como es el caso de usos del terreno o el tipo de demanda de agua) o cuantitativa (elevación o caudal demandado en cada punto de una red).

Se han descrito varias estructuras de datos para el almacenamiento permanente de esta información. La primera sería una enumeración exhaustiva. Consiste básicamente en la recogida de manera individualizada y secuencial de los contenidos de cada celda.

Obviamente, cuando el ámbito de trabajo es grande o el tamaño de la celda (o, lo que es lo mismo, la resolución) muy pequeño, la cantidad de información que debe ser

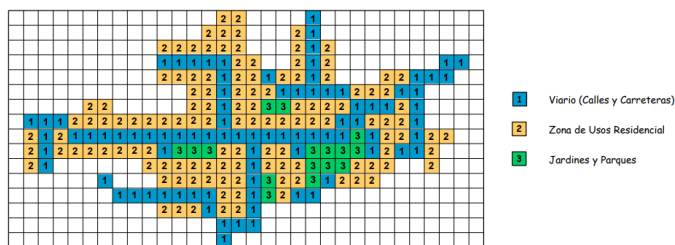
almacenada y gestionada crece hasta hacerse excesiva. Este hecho constituye el principal inconveniente de esta estructura.

Como alternativa para optimizar los recursos, se propone una enumeración por filas, en la cual se da el valor de la variable y la primera y última columna en la cual ese valor se mantiene. Esta estructura es especialmente adecuada en sistemas en los cuales está presente el principio de correlación espacial, porque la mayoría de las celdas contiguas tienen el mismo valor. En ocasiones, sólo se almacena el valor y la última celda donde la variable toma ese valor, sobreentendiéndose la columna en la cual comienza el siguiente conjunto de valores. A veces también se almacena el valor y el número de celdas que toman ese valor.

Sea cual sea la estructura de datos elegida para almacenar la información contenida en un plano, la principal limitación del modelo ráster es que, para cada variable, se guarda un plano. Esto es, para cada variable es necesario almacenar una capa de información tal y como se ha descrito en las secciones anteriores. En la figura 4 se muestra un esquema de cómo la información de un plano se almacena en el modelo ráster. Se puede ver que una rejilla se superpone al plano y que cada celda toma un valor dependiendo del uso que la tierra tiene. En este caso, se usó un código de color para representar cada uso de suelos en el plano, pero para cada celda el uso de suelos que toma el mayor porcentaje de ella, se ha almacenado en la base de datos como un código alfanumérico (un número o una letra).

Este tipo de modelo de datos es especialmente adecuado para variables geográficas, en las cuales se encuentran pocas formas geométricas regulares y se debe describir la forma exacta de las áreas con el mismo valor con muchos polígonos y segmentos. Por tanto, su principal aplicación es la descripción del terreno (modelos digitales de elevación, mapas temáticos, mapas de pendientes, etc.)

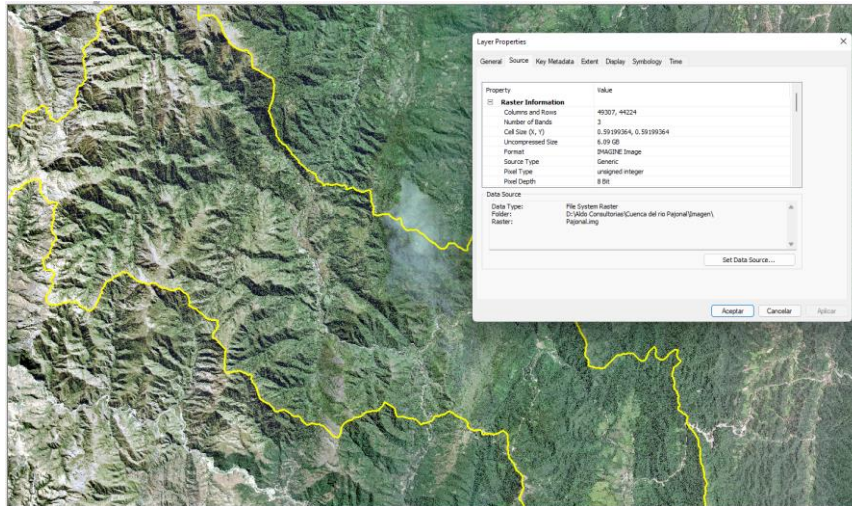
Figura 4. Esquema de representación ráster de la información contenida en un mapa.



Fuente: Fundamentos de SIG - Aplicaciones con ArcGIS de Pucha-Cofrep et al. 2017

Para la descripción y la creación de las entidades de la cuenca (uso de suelos, grupos hidrológicos del suelo, drenajes y otros) se usó un ráster (imagen de satélite) con un tamaño de pixel de 0.59 x 0.59 metros.

Figura 5. Ráster usado



Fuente: Elaboración propia

2.4 Morfometría

Es el estudio cuantitativo de las características físicas de una cuenca hidrográfica, y se utiliza para analizar la red de drenaje, las pendientes y la forma de una cuenca a partir del cálculo de valores numéricos. Dentro de este contexto, es importante señalar que las mediciones deben ser realizadas sobre un mapa con suficiente información hidrográfica y topográfica.

La morfometría de cuencas resulta de gran utilidad ya que permite el estudio de la semejanza de los flujos de diferentes tamaños con el propósito de aplicar los resultados de los modelos elaborados en pequeña escala a prototipos de gran escala (Ruiz, 2001; Chow et al. 1994 citado por Delgadillo Santander & Moreno Barrios, pág. 1).

Los parámetros morfométricos de una cuenca integran un conjunto de estimaciones realizadas, en la mayoría de los casos, al iniciar un estudio hidrológico, con fines de aprovechamiento o control; sobre todo cuando la cuenca en análisis no cuenta con información hidrométrica y habrá que aplicar ciertos métodos y criterios, para efectuar las determinaciones hidrológicas básicas, como son: el régimen de escurrimientos líquidos y sólidos y sus avenidas normales y máximas.

El análisis morfométrico es el estudio de un conjunto de variables lineales, de superficie y de relieve; que permite conocer las características físicas de una cuenca, lo cual permite realizar comparaciones entre varias cuencas, así como ayuda a la interpretación de la funcionalidad hidrológica y en la definición de las estrategias para la formulación de su manejo.

En general, todos los parámetros son fáciles de obtener y constituyen el punto de partida de las estimaciones hidrológicas en una cuenca.

2.5 Método del Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS)

2.5.1 Número de Curva (CN)

El método del número de curva fue desarrollado en la década de 1950 por el Servicio de Conservación del Suelo del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, o "SCS" (actualmente Servicio de Conservación de Recursos Naturales, o "NRCS"). Lleva utilizándose unos 50 años, y es un medio popular, omnipresente y duradero de estimar la escorrentía de las tormentas provocada por las precipitaciones. Desde su creación, se ha aprendido mucho sobre el método CN y sus orígenes, han surgido nuevas aplicaciones y desarrollos, y se han adquirido conocimientos sobre la hidrología general de la escorrentía pluvial a través de su aplicación. Sin embargo, no existe ningún documento que recoja esta situación y conocimientos actuales. Quienes la aplican, la enseñan o la estudian la necesitan. En consecuencia, en 1997 se encargó al Comité de Trabajo de Hidrología del Número de Curva ASCE/EWRI que “cotejara, solicitara y revisara materiales, y preparara un informe sobre el estado de la práctica en hidrología del número de curva para la estimación lluvia-escorrentía”. Los resultados se publicaron en el libro número de curva hidrológico - estado de la práctica (ASCE/EWRI Curve Number Hydrology Task Committee, 2009).

Los valores del número de curva utilizados en este trabajo de investigación se extrajeron de este libro que explica en detalle la forma de emplearlos. Este informe es principalmente una síntesis de la literatura sobre la evolución y el crecimiento del método desde su inicio.

El método del Número de Curva (CN) es un método empírico de escorrentía superficial desarrollado por el Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS acrónimo en inglés de Natural Resources Conservation Service) del Departamento de Agricultura de

los Estados Unidos (USDA acrónimo en inglés de US Department of Agriculture), mientras que antes se llamaba Servicio de Conservación de Suelos (SCS acrónimo en inglés de Soil Conservation Service). El método del CN del NRCS estima el exceso de precipitación en función de la precipitación acumulada, grupos hidrológicos del suelo, el uso de suelos y la humedad antecedente del suelo. (SCS, 1985 citado por Hydrologic Engineering Center, 2023, pág. 44).

El valor del Número de Curva (CN) de entrada en la ecuación o en el gráfico se obtiene mediante tablas; las condiciones del terreno contempladas son: uso de la tierra, medidas de conservación empleadas en el cultivo, estado de compactación del terreno en relación a su uso, capacidad de infiltración del suelo en atención a su textura y, finalmente, condición antecedente de humedad del suelo; varía entre 1 y 100, siendo mayor cuanto peor sea su situación.

2.5.1.1 Uso de la tierra

El uso de la tierra implica directamente el nivel de protección del suelo por la cobertura vegetal frente al impacto de las gotas de lluvia. Así, por ejemplo, en el caso de explotaciones agroforestales se incluyen las opciones de barbecho, cultivos alineados o no alineados, cultivos de elevado porcentaje de cobertura, pastizales, montes en diferentes estados de degradación vegetal, etc. o incluso el grado de impermeabilización del suelo por compactación o asfaltado (caseríos, caminos, urbanizaciones, etc.).

Tabla 2. Datos para el uso de la tierra (columna color rojo)

Números de las curvas de escorrentía para complejos hidrológicos, uso agronómico-tipo de suelos para condiciones de humedad antecedente ll.						
Cubierta del Suelo			Número de curva correspondiente a los grupos hidrológicos			
Uso de la tierra	Tratamiento o práctica	Condición hidrológica para la infiltración	A	B	C	D
Barbechos			77	86	91	94
Cultivos alineados	R	Pobres	72	81	88	91
		Buenas	67	78	85	89
	C	Pobres	70	79	84	88
		Buenas	65	75	82	86
	C-T	Pobres	66	74	80	82
		Buenas	62	71	78	81
Cultivos no alineados o con surcos y pequeños y mal definidos	R	Pobres	65	76	84	88
		Buenas	63	75	83	87
	R	Pobres	63	74	82	85
		Buenas	61	73	81	84
	C-T	Pobres	61	72	79	82
		Buenas	59	70	78	81

Cultivos densos de leguminosas o prados en rotación	R	Pobres	66	77	84	88
		Buenas	58	72	81	85
	C	Pobres	64	75	83	85
		Buenas	55	69	78	83
	C-T	Pobres	63	73	80	83
		Buenas	51	67	76	80
Pastizales naturales (pastos)		Pobres	68	79	86	89
		Regulares	49	69	79	84
		Buenas	39	61	74	80
	C	Pobres	47	67	81	88
		Regulares	25	59	75	83
		Buenas	6	35	70	79
Praderas permanentes, Montes con pastos (ganadero - forestal)			30	58	71	78
Bosques (forestales)		Pobres	45	66	77	83
		Regulares	36	60	73	79
		Buenas	25	55	70	77
		Muy pobres	56	75	86	91
	C	Pobres	46	68	78	84
		Regulares	36	60	70	76
		Buenas	26	52	63	69
		Muy buenas	15	44	54	61
Granjas			59	74	82	86
Caminos (tierra)			72	82	87	89
Carretera (superficie dura)			74	84	90	92

Fuente: Valores del nº de curva (cálculo de la escorrentía) de Ibáñez Asensio et al.

2.5.1.2 Existencia de obras o medidas de conservación

Dado un determinado uso de la tierra, la realización o no de prácticas de conservación normalmente es determinando del volumen de escorrentía generado por la lluvia. Bajo el epígrafe “Tratamiento o práctica” aparecen las posibles medidas agronómicas destinadas a la corrección de la erosión hídrica: inexistencia (R), curvas de nivel (C) y aterrazamientos (C-T).

Tabla 3. Datos para las medidas de conservación (columna color rojo)

Números de las curvas de escorrentía para complejos hidrológicos, uso agronómico-tipo de suelos para condiciones de humedad antecedente II.						
Cubierta del Suelo			Número de curva correspondiente a los grupos hidrológicos			
Uso de la tierra	Tratamiento o práctica	Condición hidrológica para la infiltración	A	B	C	D
Barbechos			77	86	91	94
Cultivos alineados	R	Pobres	72	81	88	91
		Buenas	67	78	85	89
	C	Pobres	70	79	84	88
		Buenas	65	75	82	86
	C-T	Pobres	66	74	80	82
		Buenas	62	71	78	81
Cultivos no alineados o con surcos y pequeños y mal definidos	R	Pobres	65	76	84	88
		Buenas	63	75	83	87
	R	Pobres	63	74	82	85
		Buenas	61	73	81	84

Cultivos densos de leguminosas o prados en rotación	C-T	Pobres	61	72	79	82
		Buenas	59	70	78	81
	R	Pobres	66	77	84	88
		Buenas	58	72	81	85
	C	Pobres	64	75	83	85
		Buenas	55	69	78	83
	C-T	Pobres	63	73	80	83
		Buenas	51	67	76	80
Pastizales naturales (pastos)		Pobres	68	79	86	89
		Regulares	49	69	79	84
		Buenas	39	61	74	80
	C	Pobres	47	67	81	88
		Regulares	25	59	75	83
		Buenas	6	35	70	79
Praderas permanentes, Montes con pastos (ganadero - forestal)			30	58	71	78
Bosques (forestales)		Pobres	45	66	77	83
		Regulares	36	60	73	79
		Buenas	25	55	70	77
		Muy pobres	56	75	86	91
		Pobres	46	68	78	84
		Regulares	36	60	70	76
		Buenas	26	52	63	69
		Muy buenas	15	44	54	61
Granjas			59	74	82	86
Caminos (tierra)			72	82	87	89
Carretera (superficie dura)			74	84	90	92

Fuente: Valores del n° de curva (cálculo de la escorrentía) de Ibáñez Asensio et al.

Significado de los códigos R, C y C-T

Laboreo del terreno. – La forma en que se realice las labores del terreno inducen en la escorrentía, de modo que, en la clasificación expuesta, las letras que aparecen en la segunda columna, tienen el siguiente significado.

R = Cuando las labores de la tierra, la siembra y las restantes faenas son ejecutadas sin tener en cuenta la pendiente del terreno.

C = Cuando el cultivo es por curvas de nivel.

C-T = Cuando el cultivo es por curvas de nivel y existen además terrazas abiertas (con desagüe) para la conservación del suelo.

En terrenos de pendiente inferior al 2% se considera como si fuera por curvas de nivel.

2.5.1.3 Condiciones hidrológicas para la infiltración

Además de la práctica o no de medidas de conservación, existen otros aspectos del manejo de las tierras que repercuten sobre el estado físico del suelo y, por lo tanto, sobre su tasa de infiltración. Lógicamente son específicas, presentándose hasta 5 posibles alternativas, muy pobre, pobre, regular, buena y muy buena.

- **Pastizales o pastos naturales.** – Se clasifican en tres grupos teniendo en cuenta consideraciones hidrológicas y no la producción del forraje.
 - ✓ **Pobres.** – Se consideran pobres los que son abundantemente pastados, con escasa materia orgánica sobre el terreno o cuando las plantas cubren menos del 50% de la superficie total.
 - ✓ **Regulares.** – Aquellos cuya cubierta vegetal alcanza entre un 50% y un 75% de la superficie del terreno y son moderadamente pastados.
 - ✓ **Buenos.** – Los que su cubierta vegetal supera el 75% de la superficie del terreno y son ligeramente pastados.
- **Prados permanentes.** – No son pastados, es decir su vegetación es permanente cubriendo el 100% de la superficie del terreno.
- **Montes con pastos.** – Se establecen también tres clases, basados en factores hidrológicos y no en la producción.
 - ✓ **Pobres.** – Se consideran pobres, cuando se dan labores al terreno o cuando son abundantemente pastados o incluso quemados, de modo que la superficie del terreno aparezca libre de arbustos, matas, pastos y restos vegetales.
 - ✓ **Regulares.** – Se consideran regulares, cuando son pastados, pero nunca labrados o quemados, de modo que la superficie del terreno presenta pastos y mantillo.
 - ✓ **Buenas.** – Por último, son buenos aquellos en que, protegidos del pastoreo, el terreno aparece cubierto de matas, abundantes pastos naturales y restos orgánicos de toda clase.
- **Bosque.** – Las cinco clases hidrológicas establecidas se basan en la consideración de la profundidad y grado de consolidación de las capas de mantillo y de humos del bosque, de modo que cuando mayor sea el espesor de dichas capas y menos

compactas e impermeables aparezcan, tanto mejor será la condición hidrológica resultante para la infiltración.

Tabla 4. Datos para condiciones hidrológicas para la infiltración (columna color rojo)

Números de las curvas de escorrentía para complejos hidrológicos, uso agronómico-tipo de suelos para condiciones de humedad antecedente II.						
Cubierta del Suelo			Número de curva correspondiente a los grupos hidrológicos			
Uso de la tierra	Tratamiento o práctica	Condición hidrológica para la infiltración	A	B	C	D
Barbechos			77	86	91	94
Cultivos alineados	R	Pobres	72	81	88	91
		Buenas	67	78	85	89
	C	Pobres	70	79	84	88
		Buenas	65	75	82	86
	C-T	Pobres	66	74	80	82
		Buenas	62	71	78	81
Cultivos no alineados o con surcos y pequeños y mal definidos	R	Pobres	65	76	84	88
		Buenas	63	75	83	87
	R	Pobres	63	74	82	85
		Buenas	61	73	81	84
	C-T	Pobres	61	72	79	82
		Buenas	59	70	78	81
Cultivos densos de leguminosas o prados en rotación	R	Pobres	66	77	84	88
		Buenas	58	72	81	85
	C	Pobres	64	75	83	85
		Buenas	55	69	78	83
	C-T	Pobres	63	73	80	83
		Buenas	51	67	76	80
Pastizales naturales (pastos)		Pobres	68	79	86	89
		Regulares	49	69	79	84
		Buenas	39	61	74	80
	C	Pobres	47	67	81	88
		Regulares	25	59	75	83
		Buenas	6	35	70	79
Praderas permanentes, Montes con pastos (ganadero - forestal)			30	58	71	78
Bosques (forestales)		Pobres	45	66	77	83
		Regulares	36	60	73	79
		Buenas	25	55	70	77
		Muy pobres	56	75	86	91
		Pobres	46	68	78	84
		Regulares	36	60	70	76
		Buenas	26	52	63	69
		Muy buenas	15	44	54	61
Granjas			59	74	82	86
Camino (tierra)			72	82	87	89
Carretera (superficie dura)			74	84	90	92

Fuente: Valores del n° de curva (cálculo de la escorrentía) de Ibáñez Asensio et al.

2.5.1.4 Grupos hidrológicos de suelo

Sea cual sea la clase de uso, las medidas de conservación adoptadas y el manejo realizado en nuestra explotación, un aspecto primordial en la producción de escorrentía lógicamente es la naturaleza del suelo, su mayor o menor permeabilidad. Bajo el nombre de “Grupo hidrológico del suelo” situaremos el suelo en una de las 4 clases de permeabilidad en atención a su profundidad y textura: elevada (Grupo A), moderada (Grupo B), escasa (Grupo C) y nula o prácticamente nula (Grupo D).

Las tasas de infiltración de los suelos varían mucho y se ven afectadas por la permeabilidad subsuperficial, así como por las tasas de admisión superficial. Los suelos se clasifican en cuatro grupos hidrológicos (A, B, C y D) en función de su tasa de infiltración mínima, que se obtiene para el suelo desnudo tras una humectación prolongada.

La mayoría de las zonas urbanas sólo están parcialmente cubiertas por superficies impermeables: el suelo sigue siendo un factor importante en las estimaciones de la escorrentía. La urbanización tiene un mayor efecto sobre la escorrentía en las cuencas hidrográficas con suelos que tienen altas tasas de infiltración (arenas y gravas) que en las cuencas predominantemente de limos y arcillas, que generalmente tienen bajas tasas de infiltración.

Cualquier alteración de un perfil de suelo puede cambiar significativamente sus características de infiltración. Con la urbanización, los perfiles de suelo nativo pueden mezclarse o eliminarse o puede introducirse material de relleno procedente de otras zonas.

El número de curva está relacionado con el grupo hidrológico del suelo (la capacidad de infiltración del suelo y la profundidad del nivel freático) y el uso de la tierra. El NRCS ha dividido los suelos en cuatro grupos hidrológicos de suelo (Hydrologic Soil Groups) según la capacidad de infiltración. Los grupos se definen de la siguiente manera:

- **Grupo A:** Suelos con altas tasas de infiltración (bajo potencial de escorrentía) incluso cuando están completamente mojados. Estos consisten principalmente en arenas y gravas profundas y bien drenadas. Estos suelos tienen una tasa de infiltración final superior a 7.6 mm/hr (0.30 pulg./h).

- **Grupo B:** Suelos con tasas de infiltración moderadas cuando están completamente mojados. Estos consisten principalmente en suelos que son moderadamente profundos a profundos, moderadamente bien drenados a bien drenados con texturas de suelo moderadamente finas a moderadamente gruesas. Estos suelos tienen tasas de infiltración final de 3.8-7.6 mm/hr (0.15-0.30 pulg./h).
- **Grupo C:** Suelos con tasas de infiltración lentas cuando están completamente mojados. Estos consisten principalmente en suelos con una capa que impide el movimiento descendente del agua o suelos con texturas moderadamente finas a finas. Estos suelos tienen tasas de infiltración final de 1.3-3.8 mm/hr (0.05-0.15 pulgadas/hr).
- **Grupo D:** Suelos con tasas de infiltración muy lentas (alto potencial de escorrentía) cuando están completamente mojados. Estos consisten principalmente en suelos arcillosos con un alto potencial de hinchamiento, suelos con una alta capa freática permanente, suelos con una capa arcillosa o arcilla en o cerca de la superficie, y suelos poco profundos sobre materiales casi impermeables. Estos suelos tienen tasas de infiltración final inferior a 1.3 mm/hr (0.05 pulg./h).

Tabla 5. Datos para la permeabilidad del suelo (columna color rojo)

Números de las curvas de escorrentía para complejos hidrológicos, uso agronómico-tipo de suelos para condiciones de humedad antecedente II.						
Cubierta del Suelo			Número de curva correspondiente a los grupos hidrológicos			
Uso de la tierra	Tratamiento o práctica	Condición hidrológica para la infiltración	A	B	C	D
Barbechos			77	86	91	94
Cultivos alineados	R	Pobres	72	81	88	91
		Buenas	67	78	85	89
	C	Pobres	70	79	84	88
		Buenas	65	75	82	86
	C-T	Pobres	66	74	80	82
		Buenas	62	71	78	81
Cultivos no alineados o con surcos y pequeños y mal definidos	R	Pobres	65	76	84	88
		Buenas	63	75	83	87
	R	Pobres	63	74	82	85
		Buenas	61	73	81	84
	C-T	Pobres	61	72	79	82
		Buenas	59	70	78	81
Cultivos densos de leguminosas o prados en rotación	R	Pobres	66	77	84	88
		Buenas	58	72	81	85
	C	Pobres	64	75	83	85
		Buenas	55	69	78	83
	C-T	Pobres	63	73	80	83
		Buenas	51	67	76	80
		Pobres	68	79	86	89

Pastizales naturales)	(pastos C	Regulares	49	69	79	84
		Buenas	39	61	74	80
		Pobres	47	67	81	88
		Regulares	25	59	75	83
		Buenas	6	35	70	79
Praderas permanentes, Montes con pastos (ganadero - forestal)			30	58	71	78
Bosques (forestales)	Pobres	45	66	77	83	
	Regulares	36	60	73	79	
	Buenas	25	55	70	77	
	Muy pobres	56	75	86	91	
	Pobres	46	68	78	84	
	Regulares	36	60	70	76	
	Buenas	26	52	63	69	
Muy buenas		15	44	54	61	
Granjas			59	74	82	86
Caminos (tierra)			72	82	87	89
Carretera (superficie dura)			74	84	90	92

Fuente: Valores del n° de curva (cálculo de la escorrentía) de Ibáñez Asensio et al.

2.5.1.5 Condiciones previas de humedad antecedente del suelo

Finalmente es lógico pensar que la respuesta del suelo frente a una lluvia dependerá en gran medida de su estado de humedad antecedente: si se ha producido una precipitación previa lógicamente el suelo aceptará menos cantidad de agua y la escorrentía será en consecuencia mayor; por el contrario, suelos muy secos generaran menores escorrentías. El método del número de curva contempla 3 posibles estados de humedad previa (Condiciones I, II y III, de más seca o más húmeda).

Tabla 6. Condiciones de humedad del suelo en atención a las precipitaciones previas

Grupo AMC	Precipitación total caída durante 5 días anteriores	
	En el período húmedo (octubre - marzo) o durante la dormancia	En el período seco (abril - septiembre) o durante el crecimiento
I	Menos de 12.7 mm	Menos de 35.6 mm
II	De 12.5 mm a 28 mm	De 35.5 a 53 mm
III	Más de 28 mm	Más de 53 mm

Fuente: Valores del n° de curva (cálculo de la escorrentía) de Ibáñez Asensio et al.

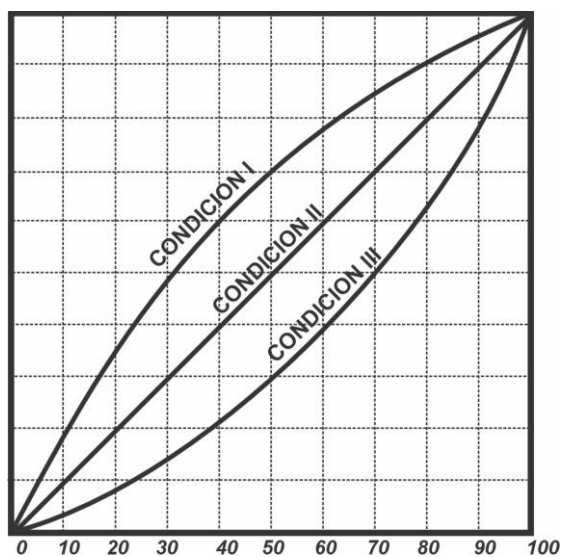
Debemos aclarar que el dato obtenido en las tablas es el correspondiente a la condición II. Caso de encontrarnos en una situación diferente en el momento de producirse una nueva lluvia deberemos modificar el número de curva obtenido mediante una tabla o gráfico.

Tabla 7. Correspondencia del valor del CN para diferentes condiciones de humedad

Conversión del número de curva de la condición II a las condiciones I y III		
Número de curva	Número de curva correspondiente a las condiciones	
II	I	III
100	100	100
95	87	99
90	78	98
85	70	97
80	63	94
75	57	91
70	51	87
65	45	83
60	40	79
55	35	75
50	30	70
45	27	65
40	23	60
35	19	55
30	15	50
25	12	45
20	9	39
15	7	33
10	4	26
5	2	17
0	0	0

Fuente: Valores del n° de curva (cálculo de la escorrentía) de Ibáñez Asensio et al.

Gráfico 1. Correspondencia del valor del CN para diferentes condiciones de humedad



Fuente: Valores del n° de curva (cálculo de la escorrentía) de Ibáñez Asensio et al.

Existen otras tablas que contemplan situaciones en ambientes áridos o semiáridos y usos del suelo diferentes a los expuestos, como por ejemplo zonas de bosque, cubiertas de matorral o monte bajo, áreas de pastizal, cultivos extensivos y parques o zonas ajardinadas, incluyendo en algunos casos las superficies impermeabilizadas a causa de la construcción de vías de comunicación y todo tipo de edificaciones (disponibles en textos especializados en conservación de suelos – ver bibliografía).

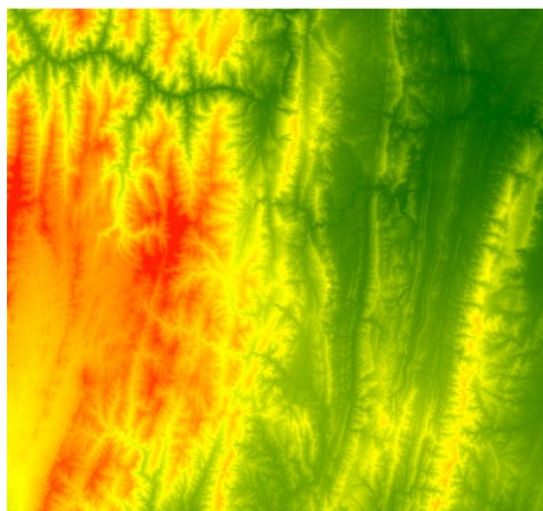
El método del número de curva posibilita la estimación de la escorrentía en una cuenca hidrográfica para una tormenta dada, normalmente la de una mayor agresividad, aplicando diferentes parámetros relativos al uso y características hidrológicas del suelo.

Este método toma en consideración la intensidad de la precipitación pluvial y la humedad previa del terreno en el momento de producirse una nueva precipitación, contemplando la posibilidad de que el suelo se encuentre ya saturado en el momento de iniciarse el nuevo evento (mayor escorrentía) o por el contrario se halle bastante seco (menor escorrentía).

2.5.1.6 Modelo digital de elevación

El método original del número de curva fue implementado sobre parcelas experimentales en terreno llano, por ello resulta de interés la incorporación del criterio de la pendiente a la asignación del número de curva del terreno, dado que es incuestionable la influencia del factor pendiente sobre la capacidad de escorrentía e infiltración del terreno.

Gráfico 2. Modelo digital de elevación.



Fuente: Satélite ALOS PALSAR, s.f.

CAPÍTULO 3:
DESARROLLO DEL TRABAJO

En el presente capítulo se explica todo lo relacionado con los materiales y métodos utilizados en la estructura del trabajo de investigación. Se inicia con la caracterización morfométrica de la cuenca utilizando el Modelo Digital de Elevación (DEM) obtenido del satélite ALOS PALSAR (12.5 x 12.5 metros). Posteriormente, se obtiene el número de curva tomando como fuente las fotografías obtenidas a través del proyecto World Imagery (0.59 x 0.59 metros).

3.1 Materiales y equipos

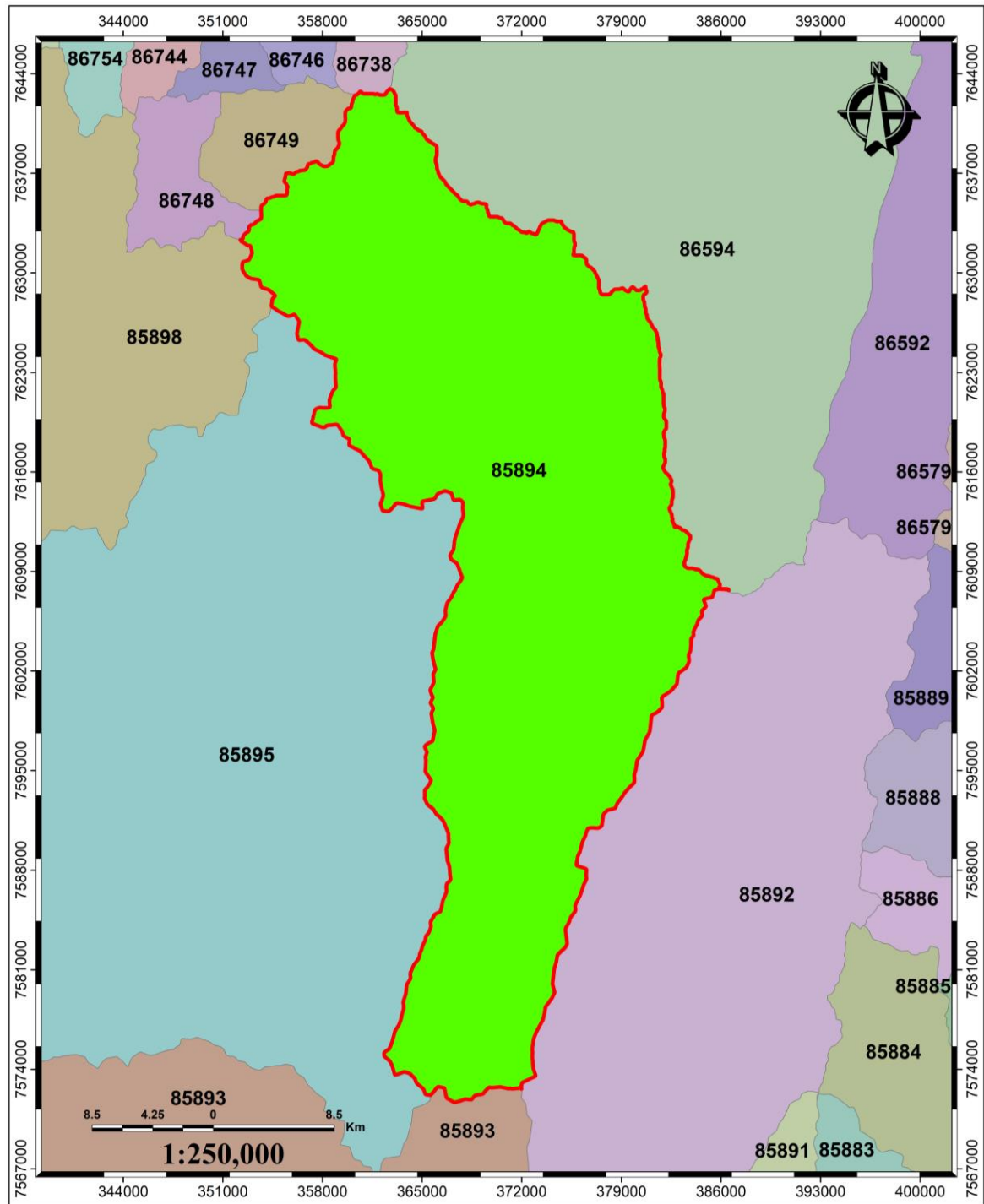
Para el desarrollo del trabajo de investigación se recurrió al tratamiento de una gran cantidad de materiales y el uso de equipos de computación:

Materiales: Se utilizó dos mosaicos de modelo digital de elevación (AP_08446_FBD_F6750_RT1 y AP_19853_FBD_F6740_RT1) para delimitar la cuenca desde el nivel 1 hasta el nivel 6, las fotografías satelitales asociadas a la cuenca, se obtuvieron del proyecto World Imagery (711 mosaicos).

Equipos: El trabajo de investigación trata exclusivamente de la manipulación de datos a nivel de sistemas de información geográfica, por lo tanto, el tratamiento de toda la información se realizó en equipos de computación.

Software: Para la creación del mosaico general de la cuenca, se utilizó Erdas Imagine. El cálculo de los datos morfométricos se generó en Idrisi. La delimitación de las unidades hidrográficas y la cuenca en bruto se realizó utilizando ArcGIS (Arc Hydro Tools). Toda la información se centralizó en una base de datos administrada en ArcGIS. Finalmente, para el cálculo del Número de Curva (CN), se utilizó la extensión creada por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos, HEC-GeoHMS.

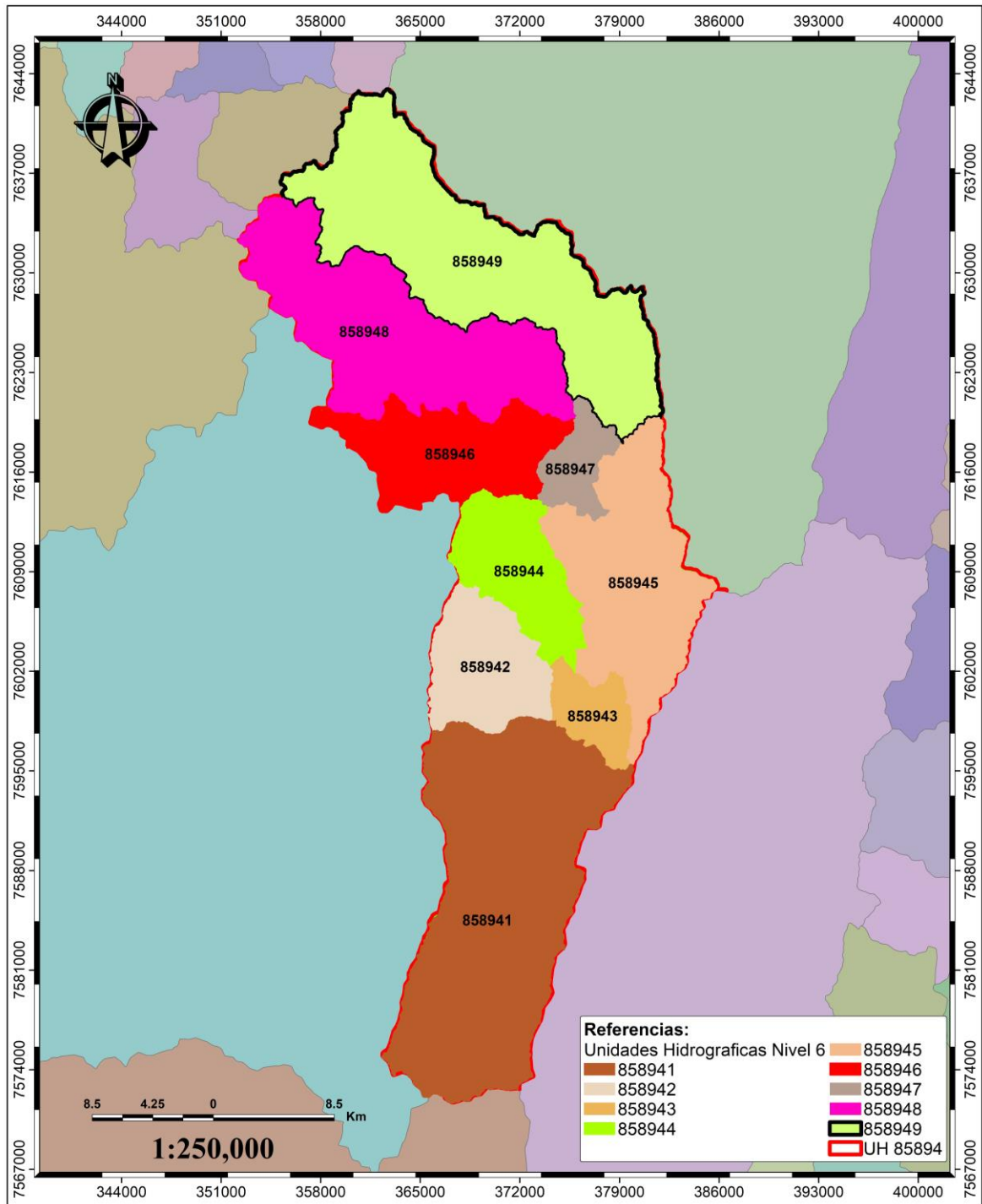
Mapa 3. Unidad hidrográfica, nivel 5



Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2010

El diagnóstico se realizó a nivel 5, sin embargo, por la dimensión de la cuenca, se vio por conveniente clasificar la cuenca hasta un nivel 6, esto ayudara a manejar escalas más pequeñas.

Mapa 4. Unidad hidrográfica, nivel 6



Fuente: Elaboración propia

La cuenca se encuentra en la unidad hidrográfica 6, con un código asignado según el método Pfafstetter de 858949.

Luego de generar el perímetro y la red de drenajes de la cuenca a partir de los modelos digitales, es necesario realizar un ajuste de estos valores. Para ello usamos la imagen de satélite.

Cuando trabajamos con cuencas demasiado grandes, puede darse el caso de que nuestra zona de estudio caiga en medio de varias imágenes. La mejor opción es crear un mosaico, para poder lanzar posteriormente los procesos que sean necesarios de forma conjunta.

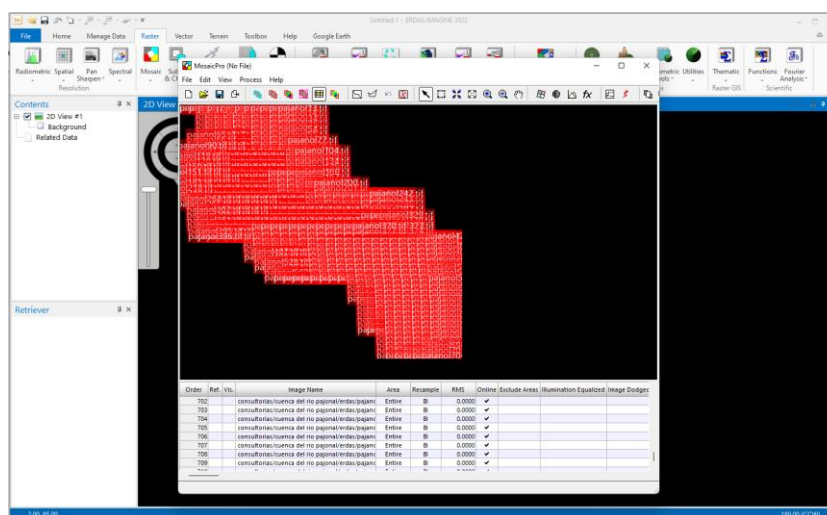
Para realizar una fotointerpretación eficiente de la cobertura vegetal y el uso de suelos se necesitan imágenes de tamaños de pixel muy reducidos lo que implica obtener una infinidad de imágenes dependiendo del área de estudio, en este caso se utilizó aproximadamente 711 imágenes para cubrir toda la extensión de la cuenca, estos ráster tienen un tamaño de pixel de 0.59 metros y cada imagen está compuesto de tres bandas y comprimidos en un formato TIFF.

Administrar de manera independiente varios ráster produce grandes dificultades en el momento de ser usados, tales como, los desplazamientos lentos, pérdida de tiempo en el momento de cargar en ArcGIS, la no uniformidad de colores en todas las imágenes. Y para solucionar todos estos inconvenientes, la mejor opción es fusionar todos estos mosaicos en un solo ráster o mosaico. Erdas Imagine, sin lugar a dudas es mejor que ArcGIS.

El mosaico es la combinación de dos o más imágenes superpuestas en una sola. Las operaciones de mosaico se realizan utilizando imágenes rectificadas y/o calibradas. Las imágenes que se utilicen como entrada deben contener información sobre el mapa y la proyección. No es necesario que las imágenes tengan el mismo sistema de proyección y el mismo tamaño de píxel. El mosaico puede aplicarse a imágenes de cámara o de satélite.

Utilizamos la estación de trabajo MosaicPro para unir imágenes georreferenciadas y formar una imagen más grande o un conjunto de imágenes (estos archivos de proyecto de mosaico se denominan con una extensión de archivo *.mop). Todas las imágenes de entrada deben contener información cartográfica y de proyección y tener el mismo número de capas. No es necesario que estén en la misma proyección ni que tengan el mismo tamaño de celdas de píxeles. También se admiten imágenes de entrada calibradas.

Gráfico 4. Tratamiento de las imágenes en Erdas Imagine

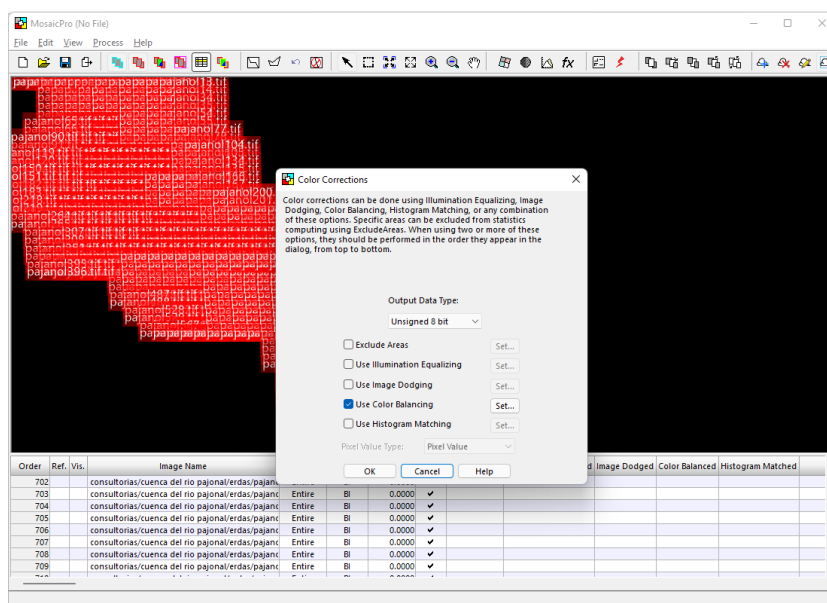


Fuente: Elaboración propia

Correcciones de color de las imágenes

Para eliminar las diferencias de tonalidades y brillo entre o dentro de los fotogramas o imágenes individuales de la cuenca, es crucial corregir el color y el desequilibrio de luz. Si estas diferencias no se corrigen, la imagen resultante mostrará manchas. Para abordar este problema, utilizamos la corrección de color mediante el Equilibrio de Color (Use Color Balancing).

Gráfico 5. Corrección de color

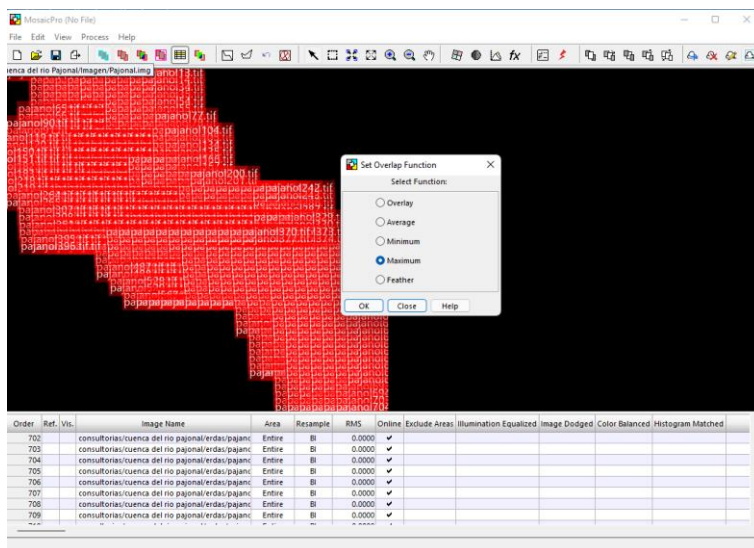


Fuente: Elaboración propia

Función de solapamiento

Establecer el tipo de intersección y la función de solapamiento para la nueva imagen en mosaico, es muy importante, se eligió la opción Máximo (Maximum), mediante esta opción el valor de cada píxel en el área de solapamiento se sustituye por el valor mayor de los píxeles correspondientes en las imágenes superpuestas.

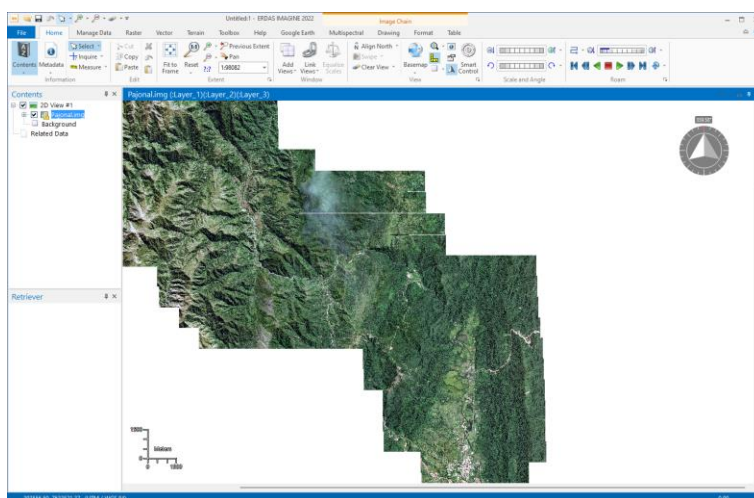
Gráfico 6. Solapamiento de las imágenes



Fuente: Elaboración propia

El resultado del tratamiento de los mosaicos individuales que son parte de la cuenca se muestra en el siguiente gráfico.

Gráfico 7. Mosaico general creado en Erdas Imagine



Fuente: Elaboración propia

3.2.2 Cuenca de intervención

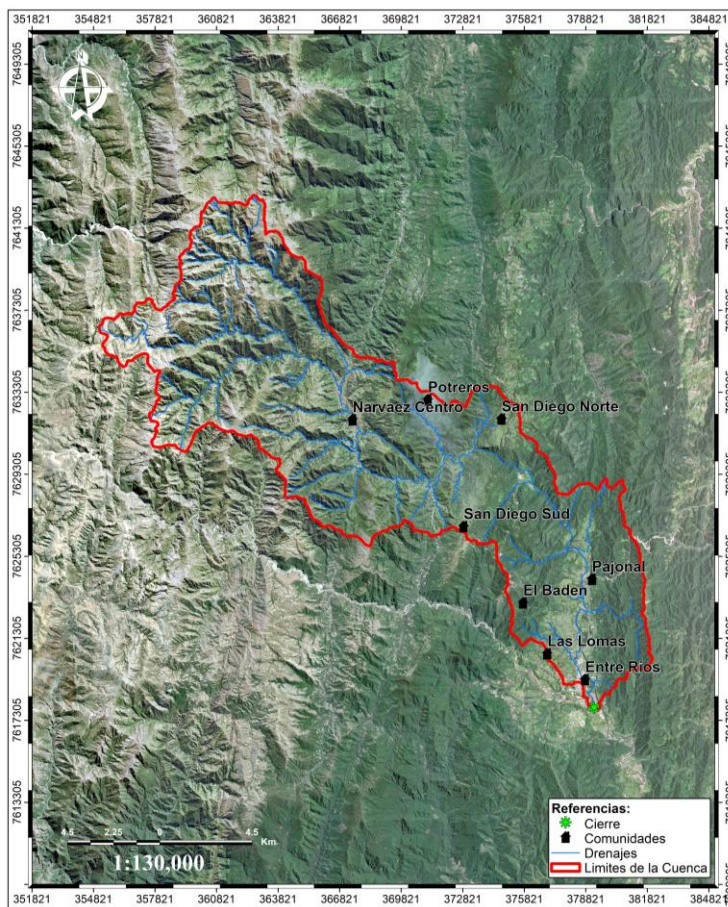
La cuenca del río Pajonal ocupa una superficie aproximada de 225.07 km², un perímetro de 104.75 km, con una amplia red de drenaje. El cauce principal de la cuenca tiene una longitud aproximada de 35.65 km y está constituida por los siguientes ríos, río La Anta, río Narváez y el río Pajonal, y los tributarios menores como el río Villa, río Chorro, río Cuesta Vieja, río Campo Santo, río Posta, y otros con una longitud aproximada de 171.81 km.

Tabla 8. Área y cierre de la cuenca

Nombre	Área		Perímetro
	Área Km ²	Área Ha	Km
Cuenca río Pajonal	225.07	22507.34	104.75
	X	Y	Altura
Cierre Cuenca río Pajonal	379220.88	7617934.74	1235.00

Fuente: Elaboración propia

Mapa 5. Cuenca del río Pajonal



Fuente: Elaboración propia

Ocho comunidades se encuentran inmersas dentro de la cuenca. La comunidad de Entre Ríos, El Baden, Pajonal, Las Lomas, Potreros, San Diego Sud, San Diego Norte y Narváz Centro.

3.2.3 Localización geográfica

La cuenca del río Pajonal, se encuentra ocupando dos distritos del municipio de Entre Ríos la mayor parte de la cuenca está ubicada en la parte central del municipio en el distrito 2 (Narváz) y la otra parte se encuentra en el distrito 1 (Entre Ríos).

Tabla 9. Coordenadas de la cuenca

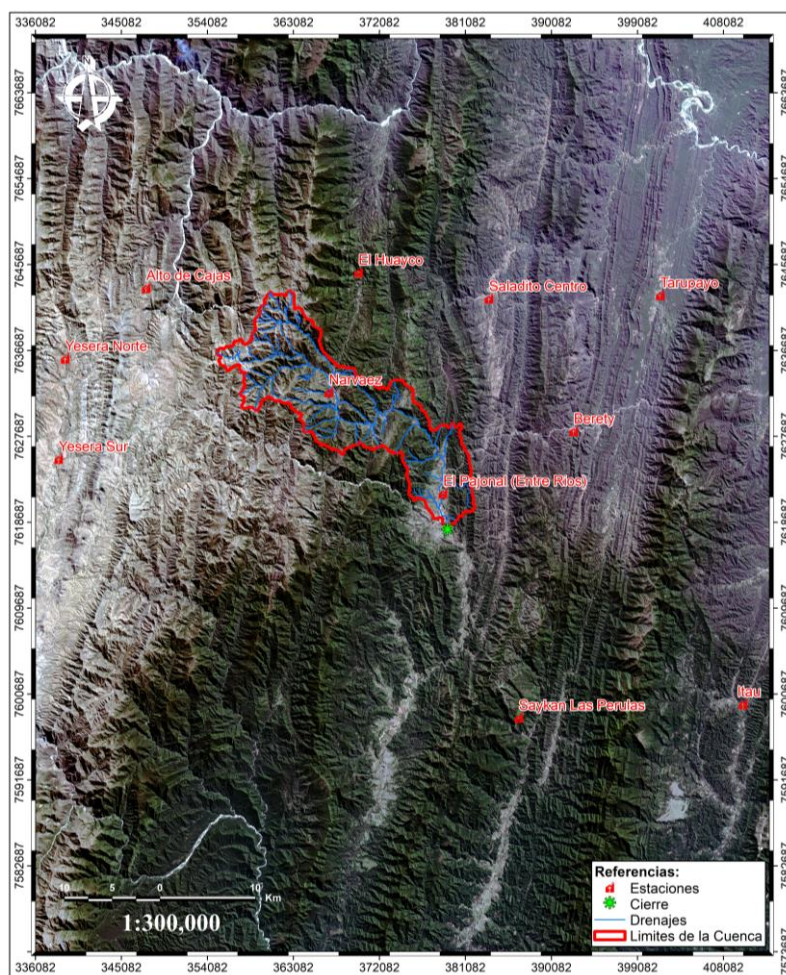
Coordenadas UTM		Coordenadas Geográficas	
Este	Norte	Latitud S	Longitud W
362400	7643200	21° 18' 40"	64° 19' 20"
379500	7617600	21° 32' 20"	64° 00' 00"
355200	7636000	21° 33' 00"	64° 24' 40"
382400	7620000	21° 31' 00"	64° 08' 20"

Fuente: Elaboración propia

3.2.4 Estaciones climatológicas

Las estaciones climatológicas cercanas y dentro de la cuenca suman un total de 11. Actualmente, todas estas estaciones están en funcionamiento. La ubicación de estas estaciones se muestra en el mapa a continuación.

Mapa 6. Estaciones climatológicas próximas a la cuenca



Fuente: Elaboración propia

En la siguiente tabla se muestra las características más sobresalientes de cada una de las estaciones próximas a la cuenca.

Tabla 10. Datos de las estaciones

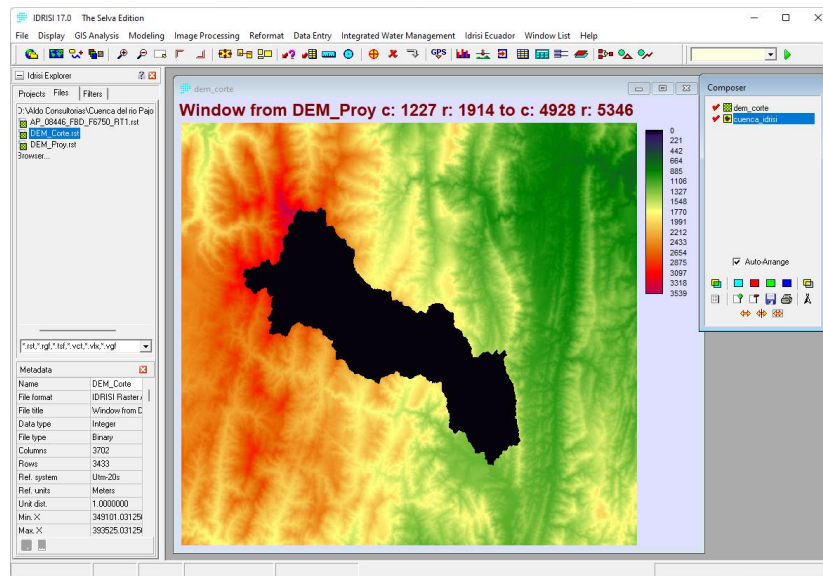
Nº	Estación	Condición	Latitud	Longitud	X	Y	Altura
1	Alto Cajas	Abierta	21°18'22"	64°28'06"	347699	7643260	2422
2	Berety	Abierta	21°26'42"	64°02'17"	392435	7628250	1103
3	El Huayco	Abierta	21°17'35"	64°15'15"	369904	7644900	1426
4	El Pajonal (Entre Ríos)	Abierta	21°30'11"	64°10'14"	378752	7621720	1260
5	Itaú	Abierta	21°42'15"	63°52'07"	410153	7599665	970
6	Narvárez	Abierta	21°24'23"	64°17'06"	366808	7632330	1755
7	Saladito Centro	Abierta	21°19'08"	64°07'22"	383555	7642140	857
8	Saykan Las Perulas	Abierta	21°42'57"	64°05'44"	386687	7598220	1356
9	Tarupayo	Abierta	21°19'41"	63°57'18"	400963	7641245	786
10	Yesera Norte	Abierta	21°22'20"	64°33'03"	339212	7635864	2277
11	Yesera Sur	Abierta	21°28'02"	64°33'30"	338539	7625339	2092

Fuente: Elaboración propia

3.3 Análisis morfométrico de la cuenca

Para calcular los valores de la morfometría de la cuenca se utilizó el software Idrisi, este software es ampliamente usado para este tipo de cálculos, los datos usados son el modelo digital de elevación y la cuenca en formato ráster.

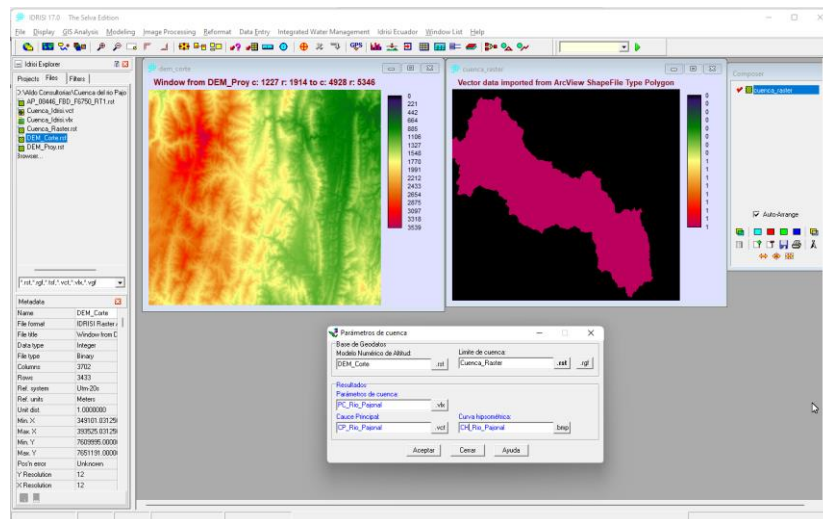
Gráfico 8. Modelo digital de elevación y la cuenca



Fuente: Elaboración propia

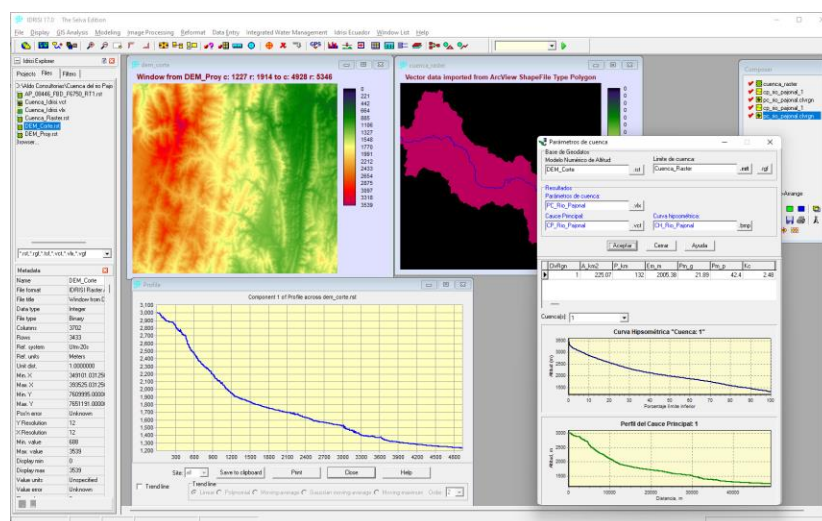
Para generar las variables morfométricas se usó el módulo Administrador Integrado del Agua (Integrated Water Management).

Gráfico 9. Datos de entrada en Idrisi



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 10. Resultados en Idrisi



Fuente: Elaboración propia

3.3.1 Área o magnitud de la cuenca (A_c)

Es el área plana en proyección horizontal, encerrada por su divisoria o parte-aguas (diferente a superficie). Usualmente el área es determinada con un planímetro y se reporta en kilómetros cuadrados, excepto para las cuencas pequeñas las cuales se expresan en hectáreas.

Las investigaciones hidrológicas han puesto de manifiesto que existe una diferencia significativa entre una cuenca pequeña y una grande. En una cuenca pequeña la cantidad y distribución del escurrimiento son influenciadas principalmente por las condiciones físicas del suelo y cobertura, sobre las cuales el hombre tiene algún control. En cambio, para grandes cuencas el efecto del almacenamiento en el cauce llega a ser pronunciado y habrá que darle más atención a la hidrología de la corriente principal (Chow, 1962 citado por Nikolay Aguirre, 2007, pág. 11).

Probablemente sea el factor más importante en la relación escorrentía – características morfológicas.

$$\text{Área de la cuenca } (A_c) = 225.07 \text{ km}^2$$

Tabla 11. Clasificación de las cuencas en función de su tamaño

Tamaño de la cuenca [km ²]	Descripción
< 25	Muy pequeña
25 a 250	Pequeña
250 a 500	Intermedia – pequeña
500 a 2500	Intermedia – grande
2500 a 5000	Grande
> 5000	Muy grande

Fuente: Manual para el manejo sustentable de cuencas hidrográficas de Nikolay Aguirre, 2007

La cuenca se clasifica como pequeña por sus dimensiones.

3.3.2 Perímetro (P)

Es la longitud total de la línea envolvente de la cuenca que pasa por la divisoria de aguas, y generalmente se la expresa en km.

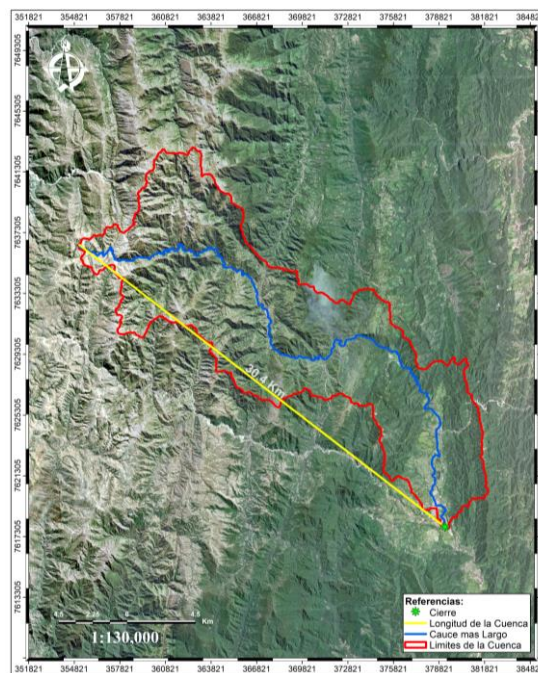
$$\text{Perímetro de la cuenca (P)} = 104.75 \text{ km}$$

3.3.3 Longitud de la cuenca (L_c)

Es la longitud medida desde la salida de la cuenca hasta el límite de la divisoria paralela al cauce principal, a lo largo de una línea recta, se expresa en km.

$$\text{Longitud del cauce (L}_c\text{)} = 30.40 \text{ km}$$

Mapa 7. Longitud de la cuenca



Fuente: Elaboración propia

La forma de la cuenca afecta las características de la descarga de la corriente, principalmente en los eventos de flujo máximo. En general, los escurrimientos de una cuenca de forma casi circular serán diferentes a los de otra, estrecha y alargada, de la misma área. (Strahler, 1964 citado por Nikolay Aguirre, 2007, pág. 11).

Para evaluar la forma de una cuenca se usan algunos índices que dan una idea numérica de esta.

3.3.4 Índice de Horton (R_f)

Horton (1932) citado por Nikolay Aguirre (2007) sugirió un factor adimensional de forma, R_f , como índice de la forma de una cuenca según la ecuación:

$$R_f = \frac{A_c}{L_c^2}$$

Nota: Los valores obtenidos a partir de este índice varían entre 0 y π ($0 < R_f < \pi$)

Donde:

R_f = Índice de forma

A_c = Área de la cuenca

L_c = Longitud de la cuenca

Este índice ha sido usado extensamente como indicadores de la forma del hidrograma unitario. El valor resultante solo da idea, qué tan cerca o lejos se está de la forma del círculo, cuyo valor $R_f = 0.79$ ($\pi/4$) (pág. 11 y 12).

$$R_f = 0.24$$

Los valores interpretativos de la relación de forma de Horton, pueden verse en el siguiente cuadro:

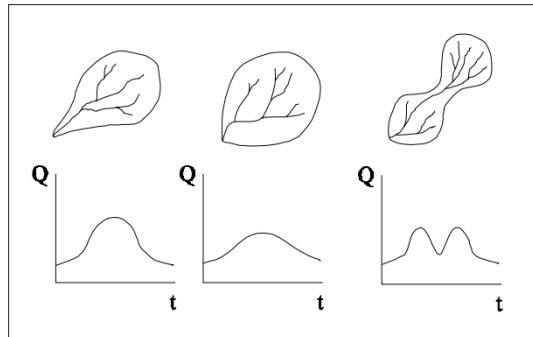
Tabla 12. Forma de la cuenca

Valores aproximados	Forma de la cuenca
> 0.22	Muy alargada
0.22 – 0.3	Alargada
0.3 – 0.37	Ligeramente alargada
0.37 – 0.45	Ni alargada ni ensanchada
0.45 – 0.60	Ligeramente ensanchada
0.60 – 0.80	Ensanchada
0.80 – 1.20	Muy ensanchada

Fuente: Manual para el manejo sustentable de cuencas hidrográficas de Nikolay Aguirre, 2007

En base a los resultados obtenidos para el factor de forma por el índice Horton, podemos concluir que la cuenca es alargada.

Gráfico 11. Hidrogramas según la forma de la cuenca



Fuente: Manual para el manejo sustentable de cuencas hidrográficas de Nikolay Aguirre, 2007

La forma de la cuenca afecta los hidrogramas de caudales máximos, por lo que se han hecho numerosos esfuerzos para tratar de cuantificar este efecto por medio de un valor numérico.

3.3.5 Índice Gravelius o Compacidad (IC)

Gravelius definió el llamado coeficiente de compacidad (C_c) como el cociente adimensional entre el perímetro de la cuenca (P) y el perímetro de un círculo (P_c) con área igual al tamaño (A_c) de la cuenca en km^2 , es decir:

$$K_c = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

El coeficiente de compacidad tendrá como límite inferior la unidad, indicando entonces que la cuenca es circular y conforme su valor crece, indicará una mayor distorsión en su forma, es decir, se vuelve alargada o asimétrica.

$$K_c = 1.95$$

Valores cercanos a 1 indican que las cuencas tienden a una forma circular y con mayor facilidad para concentrar la escorrentía. Sin embargo, las cuencas alargadas presentan alta peligrosidad a las crecidas cuando la tormenta se mueve en la dirección aguas abajo.

La superficie de la cuenca nos ofrece una idea de la magnitud de la misma. Así, en las cuencas ovaladas, las aguas circulan por más cauces secundarios y su tiempo de concentración (tiempo que tarda la gota más alejada de la sección de salida en llegar hasta dicha sección) será mayor que en las cuencas alargadas (Wisler & Brater, 1959 citado por Nikolay Aguirre, 2007, pág. 12).

Tabla 13. Clases de Compacidad

Clases de valores de compacidad.	
Rangos de Kc	Clases de compacidad
- 1.25	Redonda a oval redonda
1.25 – 1.50	De oval redonda a oval oblonga
1.50 – 1.75	De oval oblonga a rectangular oblonga

Fuente: Manual para el manejo sustentable de cuencas hidrográficas de Nikolay Aguirre, 2007

De acuerdo a los resultados obtenidos para el coeficiente de compacidad se determina que la cuenca es de oval oblonga a rectangular oblonga.

3.3.6 Relación de elongación (R_e)

S.A. Schumm citado por Nikolay Aguirre (2007) propuso la denominada relación de elongación (R_e), definida como el cociente adimensional entre el diámetro (D) de un círculo de la misma área de la cuenca (A_c) y la misma longitud de la cuenca (L_c) (pág. 12). Entonces:

$$R_e = \frac{D}{L_c} = \frac{1.1284\sqrt{A_c}}{L_c}$$

$$R_e = 0.41$$

Tabla 14. Valores de alargamiento

Clases de valores de alargamiento	
Rangos de I	Clases de alargamiento
0.0-1.4	Poco alargada
1.5-2.8	Moderadamente alargada
2.9-4.2	Muy alargada

Fuente: Manual para el manejo sustentable de cuencas hidrográficas de Nikolay Aguirre, 2007

La cuenca es poco alargada de acuerdo al valor calculado.

3.3.7 Red de drenaje

La red de drenaje es el sistema de cauces o corrientes por el que fluyen los escurrimientos superficiales, subsuperficiales y subterráneos, de manera temporal o permanente. Su importancia se manifiesta por sus efectos en la formación y rapidez de drenado de los escurrimientos normales o extraordinarios, además de proporcionar indicios sobre las condiciones físicas del suelo y de la superficie de la cuenca.

Se define como red hidrográfica o red de drenaje al camino natural, permanente o temporal, por el que fluyen las aguas de los escurrimientos superficiales, subsuperficiales y subterráneos.

Las características que señalaremos en este apartado son: tipos de corriente y número de orden de un cauce.

3.3.7.1 Tipos de corrientes

Comúnmente se clasifican en tres tipos: perennes, intermitentes y efímeras, con base en la constancia de su escurrimiento o flujo.

- Las corrientes perennes conducen agua todo el tiempo, excepto durante las sequías extremas.
- Las corrientes intermitentes llevan agua la mayor parte del tiempo, pero principalmente en épocas de lluvias.
- Las corrientes efímeras sólo conducen agua durante las lluvias o inmediatamente después de éstas (Linsley et al. 1977 citado por Nikolay Aguirre, 2007, pág. 13).

3.3.7.2 Número de orden del cauce (u) y colector principal

“El orden de cauce es una clasificación que refleja el grado de ramificación o bifurcación dentro de una cuenca” (Linsley et al. 1999 citado por Nikolay Aguirre, 2007, pág. 13)

Horton (1945) citado por Nikolay Aguirre (2007) sugirió la clasificación de cauces de acuerdo al número de orden de un río (u) como una medida de la ramificación del cauce principal en una cuenca hidrográfica. Un río de primer orden es un tributario pequeño sin ramificaciones. Un río de segundo orden es uno que posee únicamente ramificaciones de primer orden. Un río de tercer orden es uno que posee solamente ramificaciones de primero y segundo orden. Un río de cuarto orden es uno que contiene únicamente

ramificaciones de primero, segundo y tercer orden, y así sucesivamente. El orden de una cuenca hidrográfica está dado por el número de orden del cauce principal.

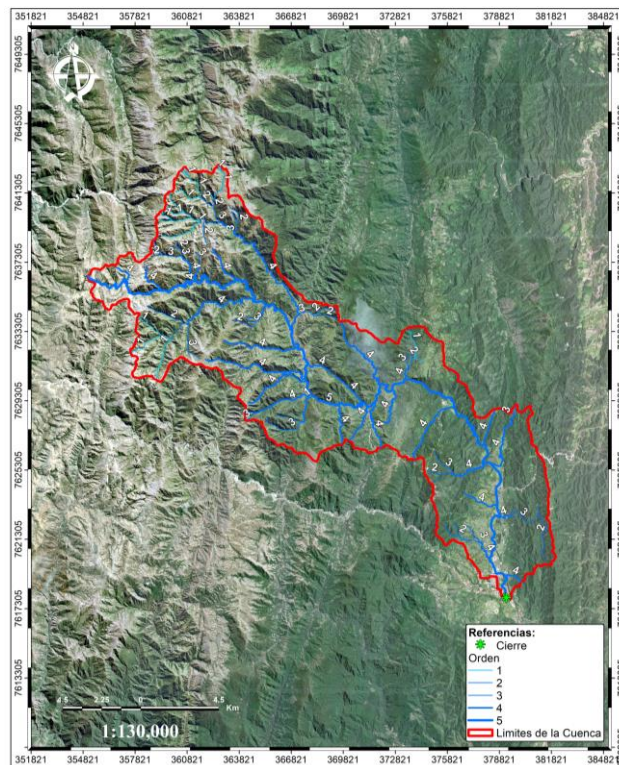
Entonces el orden de la corriente o colector principal será un indicador de la magnitud de la ramificación y de la extensión de la red de drenaje dentro de la cuenca. Al respecto, la determinación del cauce principal, se lleva a cabo del punto de salida de la cuenca hacia aguas arriba, siguiendo a la corriente de más alto orden, hasta alcanzar una bifurcación de dos corrientes de igual orden, entonces, la rama o cauce que tenga una mayor área de cuenca es seleccionado; a partir de tal punto el proceso se repite hasta terminar en un tributario de orden uno (pág. 13).

La cuenca tiene un orden de drenajes = 5

La cuenca posee la siguiente clasificación:

- Cauce principal
- Afluentes
- Quebradas
- Arroyos y
- Las nacientes hídricas.

Mapa 8. Clasificación de los cauces



Fuente: Elaboración propia

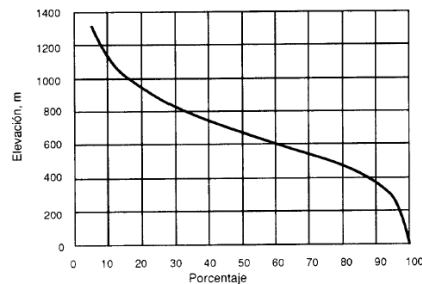
3.3.8 Parámetros de relieve

3.3.8.1 Elevación media de la cuenca

La altura media de la cuenca tiene influencia fundamental en el régimen hidrológico, puesto que la tiene sobre las precipitaciones que alimentan al ciclo hidrológico de la cuenca.

A partir de la curva hipsométrica se puede determinar fácilmente la denominada elevación mediana de la cuenca, la cual equivale a la cota correspondiente al 50 % del área de la cuenca. Es frecuente definir el relieve de una cuenca por medio de esta curva, la cual representa gráficamente las elevaciones del terreno en función de las superficies correspondientes.

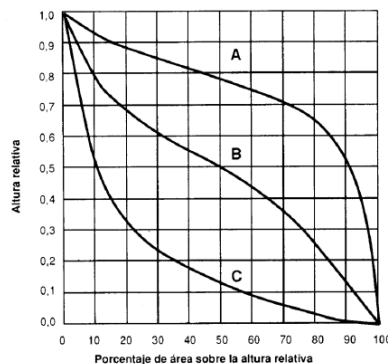
Gráfico 12. Curva hipsométrica.



Fuente: Manual para el manejo sustentable de cuencas hidrográficas de Nikolay Aguirre, 2007

- A.- Etapa de desequilibrio. Cuenca geológicamente joven, cuenca de meseta
- B.- Etapa de equilibrio. Cuenca geológicamente madura, cuenca de pie de montaña
- C.- Cuenca erosionada. Cuenca de valle

Gráfico 13. Curvas hipsométricas características del ciclo de erosión



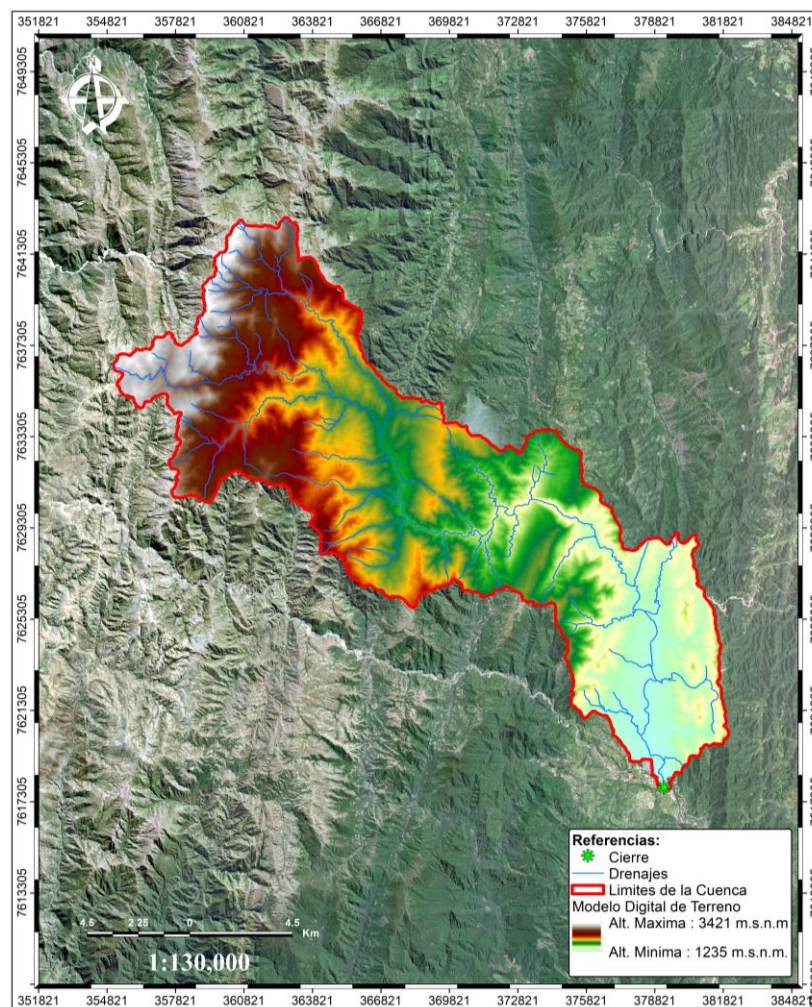
Fuente: Manual para el manejo sustentable de cuencas hidrográficas de Nikolay Aguirre, 2007

Etapas del equilibrio de la cuenca mediante el análisis hipsométrico.

La curva superior (curva A) refleja una cuenca con un gran potencial erosivo; la curva intermedia (curva B) es característica de una cuenca en equilibrio; y la curva inferior (curva C) es típica de una cuenca sedimentaria. Quedarían, así, representadas distintas fases de la vida de los ríos.

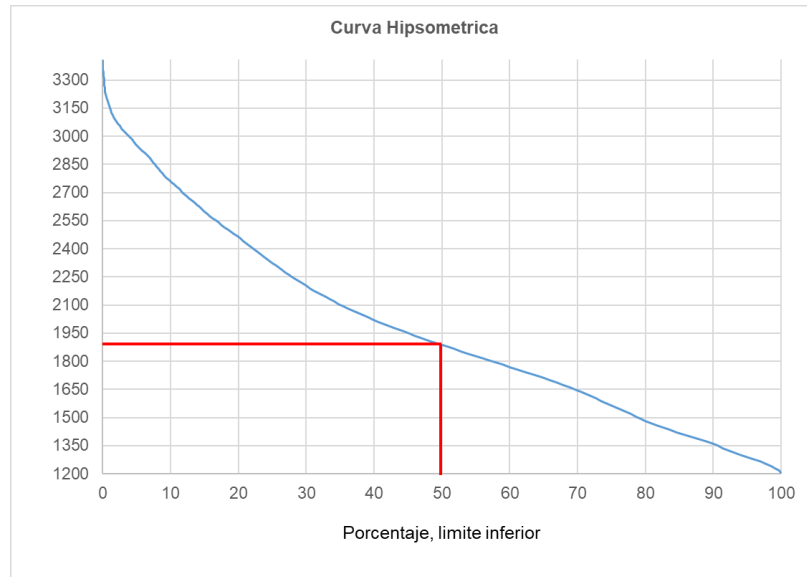
La curva hipsométrica o curva de área – elevación se construye determinando con un planímetro el área entre curvas de nivel y representando en una gráfica el área acumulada por encima o por debajo de una cierta elevación, en función de tal cota. (Klohn, 1970; Linsley et al. 1949; López & Blanco, 1976; Linsley et al. 1977 citado por Nikolay Aguirre, 2007, pág. 15 y 16).

Mapa 9. Mapa de alturas



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 14. Curva hipsométrica de la cuenca



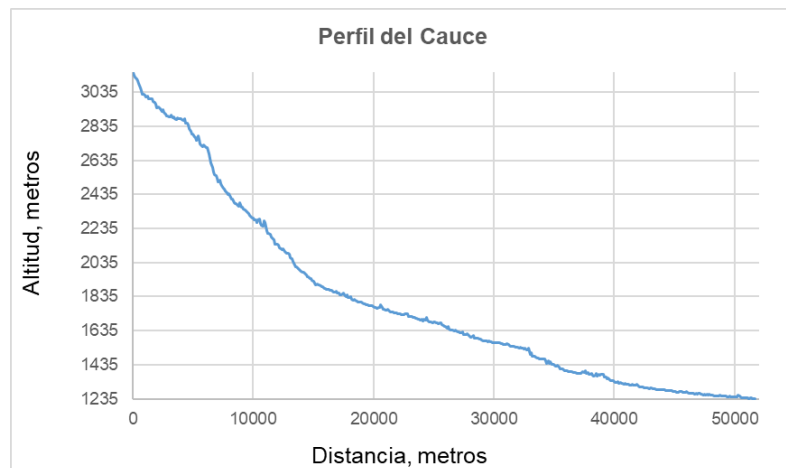
Fuente: Elaboración propia

Según la forma de la curva hipsométrica podemos concluir que la cuenca es del tipo B, es decir es una cuenca en equilibrio.

3.3.8.2 Pendiente y perfil del cauce principal

La pendiente del cauce principal se relaciona con las características hidráulicas del escurrimiento, en particular con la velocidad de propagación de las ondas de avenida y con la capacidad para el transporte de sedimentos. (Klohn, 1970 citado por Nikolay Aguirre, 2007, pág. 16).

Gráfico 15. Perfil del cauce principal de la cuenca



Fuente: Elaboración propia

Con fines prácticos la pendiente del cauce principal se puede estimar mediante el criterio simplificado que consiste en dividir el desnivel del río entre su longitud, esto es:

$$S_1 = \frac{H}{L_p}$$

Donde:

S_1 = Pendiente del cauce principal, adimensional

H = Desnivel del río, en m

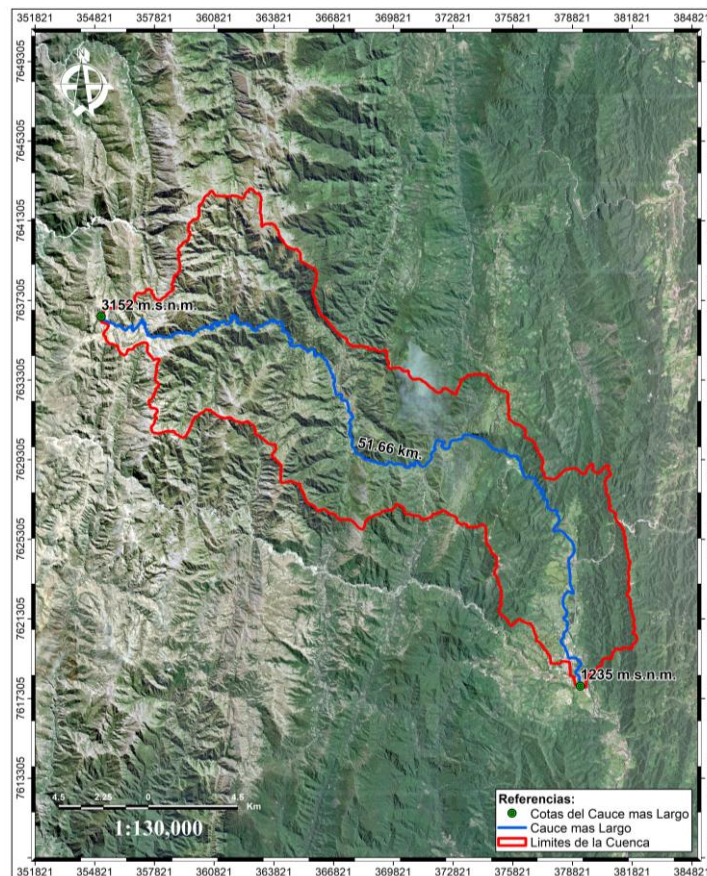
L_p = Longitud del cauce principal, en m

$$H = \frac{3152.00 \text{ m} - 1235.00 \text{ m}}{51.66 \text{ km}}$$

$$S_1 = 0.0371 \text{ m/m}$$

$$S_1 = 3.71\%$$

Mapa 10. Longitud del cauce principal y cotas



Fuente: Elaboración propia

Tabla 15. Clasificación del terreno en función de la pendiente del cauce principal

Pendiente (s) (%)	Tipo de terreno
2	Llano
5	Suave
10	Accidentado medio
15	Accidentado
25	Fuertemente accidentado
50	Escarpado
> 50	Muy escarpado

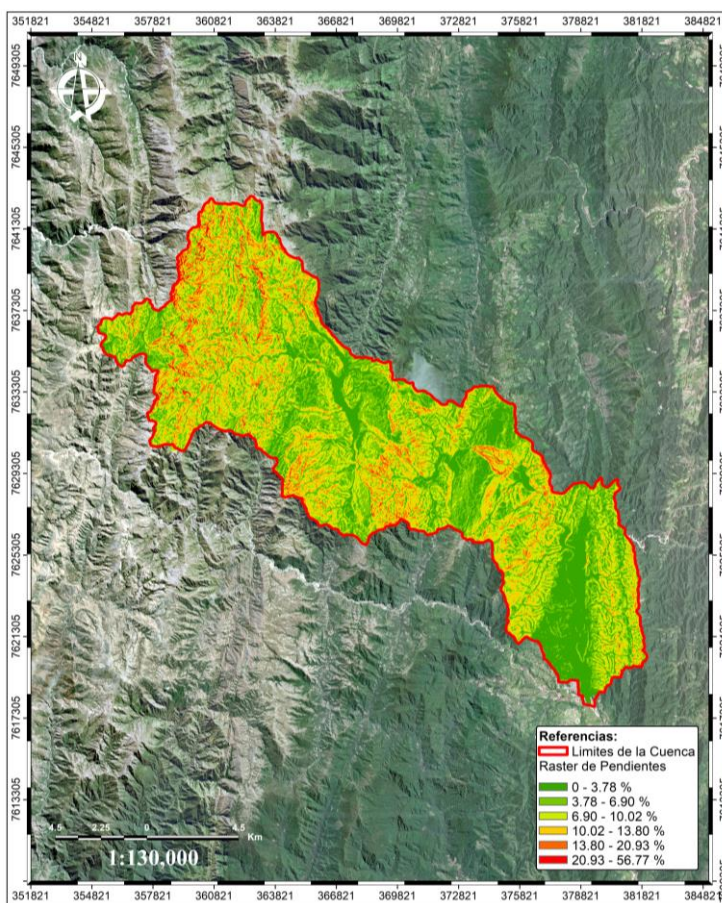
Fuente: Manual para el manejo sustentable de cuencas hidrográficas de Nikolay Aguirre, 2007

En función de la pendiente del cauce principal de la cuenca podemos concluir que se clasifica de llano a suave.

3.3.8.3 Pendiente media de la cuenca

La pendiente de la cuenca tiene un valor máximo de 56.77% y una mínima de 0%, con una pendiente media de 42.40%.

Mapa 11. Pendientes de la cuenca



Fuente: Elaboración propia

3.3.9 Tiempo de concentración

También denominado tiempo de respuesta o de equilibrio, Llamas (1993) citado por Nikolay Aguirre (2007) lo define como el tiempo requerido para que, durante un aguacero uniforme, se alcance el estado estacionario; es decir, el tiempo necesario para que todo el sistema (toda la cuenca) contribuya eficazmente a la generación de flujo en el desagüe (pág. 71).

Se atribuye muy comúnmente el tiempo de concentración al tiempo que tarda una partícula de agua caída en el punto de la cuenca más alejado (según el recorrido de drenaje) del desagüe en llegar a éste. Esto no se corresponde con el fenómeno real, pues puede haber puntos de la cuenca en los que el agua caída tarde más en llegar al desagüe que el más alejado. Además, debe tenerse claro que el tiempo de concentración de una cuenca no es constante; depende, como indican Marco & Reyes (1992) citado por Nikolay Aguirre (2007) de la intensidad del chubasco, aunque muy ligeramente. Por tener el concepto de tiempo de concentración una cierta base física, han sido numerosos los autores que han obtenido formulaciones del mismo, a partir de características morfológicas y geométricas de la cuenca. A continuación, se muestran algunas de esas fórmulas empíricas:

3.3.9.1 Fórmula de Kirpich (1940)

Desarrollada con información proporcionada por el Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS) en siete cuencas en Tennessee (USA) de áreas comprendidas entre 0.0051 y 0.433 km², en canales de altas pendientes (3 – 10%). Es una de las fórmulas más tradicionales que expresa el tiempo de concentración en horas así:

$$T_c = 0.000325 \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.77}$$

Donde:

T_c : Es el tiempo de concentración de la cuenca, en horas.

L : Es la longitud del cauce principal en metros.

S : Es la pendiente del canal en m/m.

$$T_c = 4.91 \text{ hrs}$$

3.3.9.2 Fórmula California Culverts Practice

El concepto detrás de la fórmula se basa en la relación entre la longitud de la cuenca, la pendiente del terreno y la cobertura del suelo. La fórmula considera estos factores para estimar el tiempo que tomará el flujo de agua en alcanzar el punto de salida. Proporciona el tiempo de concentración de la cuenca, t_c , en horas.

$$t_c = 60 * \left(0.86 * \frac{L^3}{H} \right)^{0.385}$$

Donde:

t_c : Es el tiempo de concentración de la cuenca, en horas.

L: Es la longitud del cauce principal en kilómetros.

H: Es el desnivel medio del cauce principal en metros.

$$T_c = 4.92 \text{ hrs}$$

3.3.9.3 Fórmula de Ventura

Esencialmente es una modificación de la ecuación de Kirpich; desarrollada para pequeñas cuencas montañosas en California. En sistema internacional de unidades, el tiempo de concentración en horas se evalúa mediante la siguiente expresión (Rowe & Thomas, 1942 citado por Nikolay Aguirre, 2007, pág. 78):

$$T_c = 0,067 * \frac{L^{1,155}}{\left(\frac{H}{1000} \right)^{0,385}}$$

Donde:

T_c : Es el tiempo de concentración de la cuenca, en horas.

L: Es la longitud del cauce principal en kilómetros.

H: Es el desnivel medio del cauce principal en metros.

$$T_c = 4.97 \text{ hrs}$$

3.3.9.4 Fórmula de Témez

Es la recomendada en España, para el método racional modificado, en la Instrucción 5.2 - I.C. de Drenaje Superficial (M.O.P.U., 1990 citado por Nikolay Aguirre, 2007, pág. 81).

Se utiliza en el cálculo del hidrograma triangular de J.R. Témez. Se deriva de la fórmula del U.S. Army Corps of Engineers.

$$T_c = 0.126 * \left(\frac{L}{J^{0.35}} \right)^{0.75}$$

Donde:

T_c: Es el tiempo de concentración de la cuenca, en horas.

L: Es la longitud del cauce principal de la cuenca en kilómetros.

J: Es la pendiente del cauce principal en m/m.

$$T_c = 4.72 \text{ hrs}$$

Tabla 16. Tabla de resultados

Tiempo de Concentración				Promedio	
Kirpich	California Culverts Practice	Ventura	Témez	hr	min
4.91	4.92	4.97	4.72	4.88	292.72

Fuente: Elaboración propia

Tabla 17. Resumen de la morfometría de la cuenca en general

Registro	Unidad	Descripción
225.07	Km ²	Superficie de la cuenca
104.75	Km	Perímetro de la cuenca
51656.19	mt.	Longitud del eje del río principal
3152.00	m.s.n.m.	Cota superior del cauce principal
1235.00	m.s.n.m.	Cota inferior del cauce principal
21.89	°	Pendiente media de la cuenca (grados)
42.40	%	Pendiente media de la cuenca (porcentaje)
2005.38	m.s.n.m.	Elevación media
51.66	Km	Longitud del eje del río principal
0.0371	m/m	Pendiente del cauce principal en m/m
30.40	Km	Longitud directa del río principal
1917.00	metros	Diferencia de elevación
4.91	hr	Kirpich
4.92	hr	California Culverts Practice
4.97	hr	Ventura
4.72	hr	Témez
4.88	hr	Tc promedio
0.24	-	Índice de forma (Horton)
0.41	-	Relación de elongación
0.26	-	Coefficiente de circularidad de Miller
1.95	-	Coefficiente de compacidad (Gravelius)
1.81	-	Relación hipsométrica

Fuente: Elaboración propia

3.4 Insumos para la determinación del número de curva

Una aplicación práctica para calcular el número de curva de una cuenca con ArcGIS, es el uso de la extensión HEC-GeoHMS partiendo de lo indicado en la explicación de la teoría del método del número de curva del NRCS. Para realizar el cálculo del número de curva del NRCS se necesita cuatro insumos:

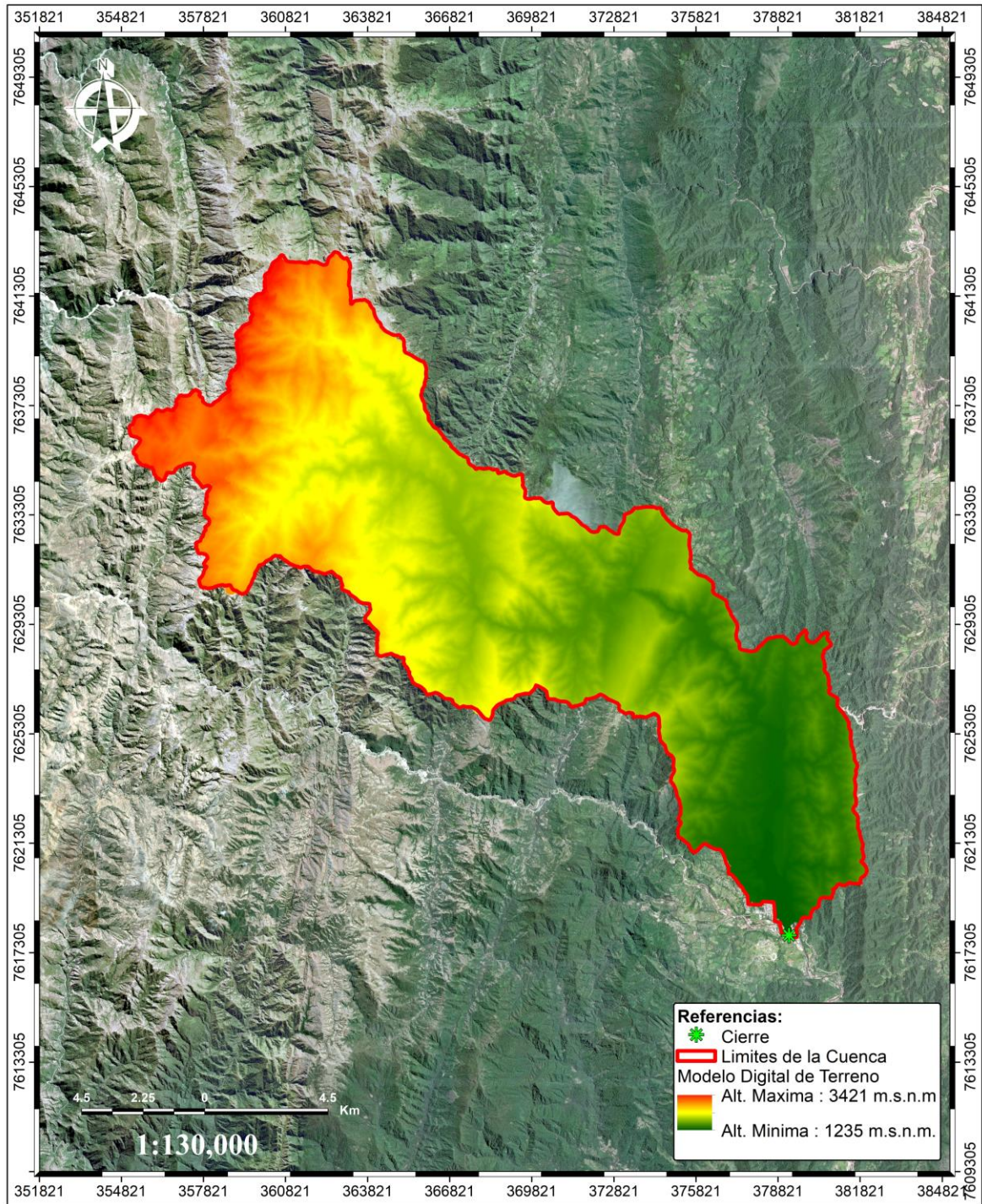
1. Modelo digital de elevación corregido
2. Grupos hidrológicos del suelo
3. Usos del suelo y
4. Tablas de búsqueda con los valores del número de curva.

3.4.1 Modelo digital de elevación corregido

Es importante eliminar las depresiones del modelo digital de elevación, al corregir el modelo se elimina los sumideros que consiste en elevar las celdas del pozo al nivel del terreno circundante. Los pozos a menudo se consideran errores en el modelo debido al muestreo y la interpolación de la grilla.

Por ejemplo, en un grupo de celdas de tres por tres, si la celda central tiene la elevación más baja en comparación con sus ocho celdas vecinas, entonces la elevación de la celda central se incrementará igual a la siguiente celda más baja. Llenar las depresiones permite que el agua fluya a través del paisaje. Esta suposición es generalmente válida cuando un gran evento de tormenta llena las pequeñas depresiones y cualquier cantidad incremental de agua que fluye hacia la depresión desplazará la misma cantidad de agua de la depresión.

Mapa 12. Modelo digital de elevación corregido



Fuente: Elaboración propia

3.4.2 Grupos hidrológicos del suelo

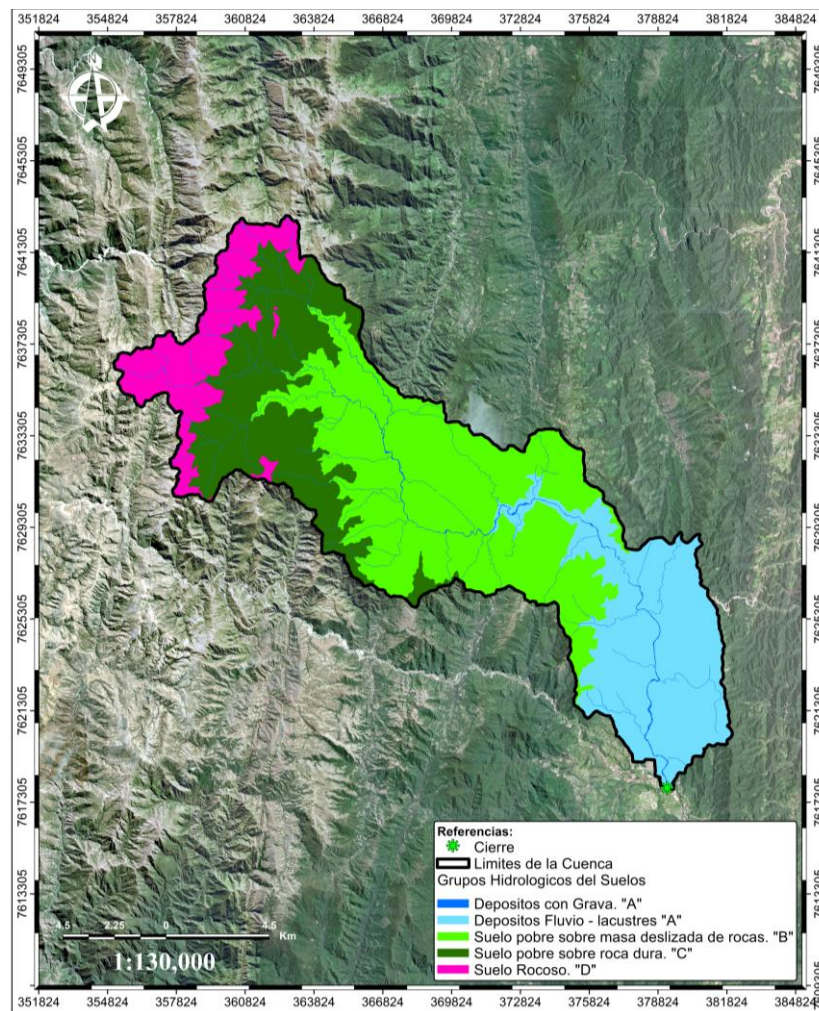
Se elabora el mapa del grupo hidrológico de suelo de acuerdo a la metodología del NRCS. En concordancia a las características de permeabilidad le asignamos un tipo que va desde “A” hasta “D”.

Tabla 18. Tipos de grupos hidrológicos de la cuenca

N	Detalle	Tipo	Área km ²
1	Depósitos con grava	A	3.96
2	Depósitos fluvio-lacustres	A	54.37
3	Suelo pobre sobre masa deslizada de rocas	B	91.21
4	Suelo pobre sobre roca dura	C	49.09
5	Suelo rocoso	D	26.45
Total			225.07

Fuente: Elaboración propia

Mapa 13. Grupos hidrológicos de suelos



Fuente: Elaboración propia

3.4.3 Uso de la tierra

Para la identificación de la cobertura de uso del suelo y litología en la cuenca del río Pajonal, se hizo uso de información geográfica y se procesaron los datos en el software ArcGIS para obtener las áreas correspondientes a cada grupo hidrológico del suelo. Se emplearon imágenes de media y alta resolución en la elaboración de este mapa.

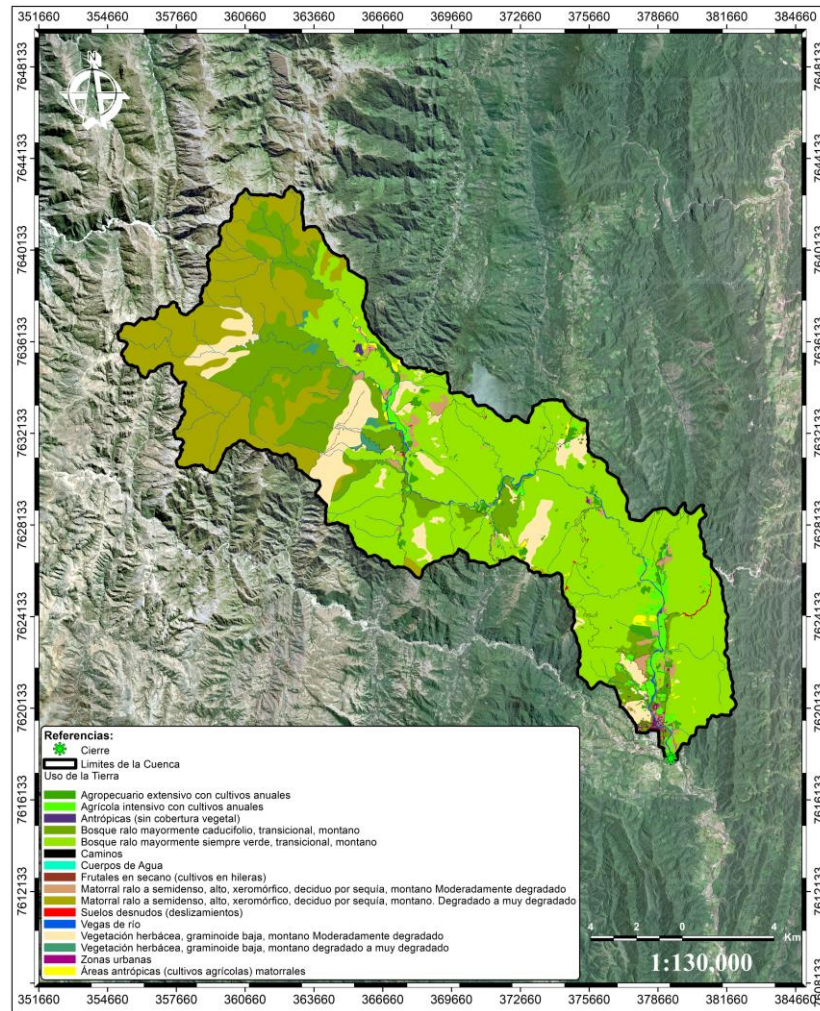
Para la delineación de todas las entidades que componen este mapa, se utilizaron polígonos como tipo de entidad. Con el fin de corregir solapamientos y astillas, se crearon topologías. A continuación, se detallan todos los componentes de la cuenca del río Pajonal, que en total suman 16 tipos de uso de la tierra.

Tabla 19. Detalle del uso de la tierra

N	Detalle	Área km ²
1	Agrícola intensivo con cultivos anuales	4.76
2	Agropecuario extensivo con cultivos anuales	3.64
3	Antrópicas (sin cobertura vegetal)	0.43
4	Áreas antrópicas (cultivos agrícolas) matorrales	0.98
5	Bosque ralo mayormente caducifolio, transicional, montano	32.39
6	Bosque ralo mayormente siempre verde, transicional, montano	109.45
7	Caminos	1.28
8	Cuerpos de agua	0.01
9	Frutales en secano (cultivos en hileras)	0.14
10	Matorral ralo a semidenso, alto, xeromórfico, deciduo por sequía, montano moderadamente degradado	3.26
11	Matorral ralo a semidenso, alto, xeromórfico, deciduo por sequía, montano degradado a muy degradado	45.47
12	Suelos desnudos (deslizamientos)	0.16
13	Vegas de río	3.96
14	Vegetación herbácea, graminoide baja, montano degradado a muy degradado	1.03
15	Vegetación herbácea, graminoide baja, montano moderadamente degradado	17.55
16	Zonas urbanas	0.57
Total		225.07

Fuente: Elaboración propia

Mapa 14. Uso de la tierra



Fuente: Elaboración propia

3.4.4 Asignación de los valores del número de curva

Para llenar los valores, tanto a la capa de los grupos hidrológicos de los suelos y el uso de la tierra se consultó y se tomó como referencias las tablas del NRCS que se explican a detalle en los anexos.

3.4.4.1 Valores para los grupos hidrológicos de suelo

En la siguiente figura se muestra la capa del polígono de grupo hidrológico del suelo. Note que la tabla de atributos contiene columnas nombradas “PctA”, “PctB”, “PctC,” y “PctD”, estas columnas contienen el porcentaje de cada grupo hidrológico de los suelos (A, B, C, y D) en la capa de polígonos de suelos. Este nuevo campo se creó en la tabla de atributos

de la entidad del tipo entero corto, y se asignó los valores manualmente a la tabla de atributos.

Gráfico 16. Valores para los grupos hidrológicos de suelo

FID	Shape	Detalle	PctA	PctB	PctC	PctD	Tipo_Suelo
0	Polygon	Depositos con Grava	59	0	0	0	A
1	Polygon	Depositos Fluvio - lacustres	57	0	0	0	A
2	Polygon	Suelo pobre sobre masa deslizada de rocas	0	66	0	0	B
3	Polygon	Suelo pobre sobre roca dura	0	0	71	0	C
4	Polygon	Suelo Rocoso	0	0	0	78	D

Fuente: Elaboración propia

3.4.4.2 Valores para el uso de la tierra

La herramienta “Generate CN Grid” de la extensión “HEC-GeoHMS” también requiere una tabla de búsqueda que relacione el uso de la tierra y los grupos hidrológicos del suelo con un número de curva. Esta tabla debe contener los números de curva y tiene campos denominados “LUValue”, “A”, “B”, “C” y “D”. La columna “LUValue” se refiere al tipo de uso de la tierra (los números se correlacionarán con los de la columna “LUValue” de la capa de uso de la tierra y el grupo hidrológico del suelo). Las columnas “A”, “B”, “C” y “D” hacen referencia al grupo hidrológico del suelo. Estas columnas contienen un número de curva apropiado para la combinación de uso de la tierra y grupo hidrológico del suelo. Por ejemplo, en la fila 1 (A) de la siguiente tabla se muestra un número de curva de 62 que se asignará a los polígonos que tienen un uso de la tierra de 1 con un grupo hidrológico del suelo de A.

Tabla 20. Tabla de búsqueda

Detalle	LUValue	A	B	C	D
Agrícola intensivo con cultivos anuales	1	62	71	78	81
Agropecuaria extensiva con cultivos anuales	2	68	79	86	89
Antrópicas (sin cobertura vegetal)	3	57	71	80	85
Áreas antrópicas (cultivos agrícolas) matorrales	4	70	79	84	88
Bosque ralo mayormente caducifolio, transicional, montano	5	45	66	77	78
Bosque ralo mayormente siempre verde, transicional, montano	6	25	55	70	77
Caminos	7	72	82	87	89
Cuerpos de agua	8	100	100	100	100
Frutales en secano (cultivos en hileras)	9	45	66	77	78
Matorral ralo a semidenso, alto, xeromórfico, deciduo por sequía, montano moderadamente degradado	10	47	67	81	88
Matorral ralo a semidenso, alto, xeromórfico, deciduo por sequía, montano degradado a muy degradado	11	77	86	91	94

Suelos desnudos (deslizamientos)	12	72	82	87	89
Vegas de río	13	30	58	71	78
Vegetación herbácea, graminoide baja, montano degradado a muy degradado	14	68	79	86	89
Vegetación herbácea, graminoide baja, montano moderadamente degradado	15	65	76	84	88
Zonas urbanas	16	74	84	90	92

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla de atributos de la entidad “uso de la tierra”, se debe crear el campo “LUValue” de tipo entero corto. Luego, se deben completar los datos de la tabla de búsqueda en el mismo orden que la tabla mencionada arriba (Tabla de búsqueda).

Gráfico 17. Tabla de atributos de la entidad uso de la tierra con el campo LUValue

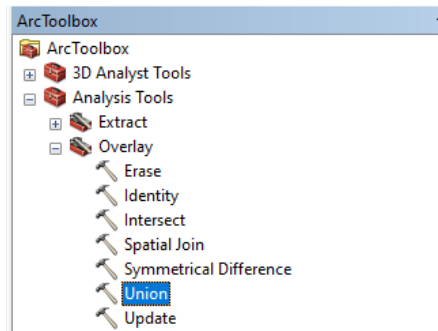
FID	Shape *	OBJECTID	Uso_Suelos	Shape_Leng	Shape_Area	LUValue
0	Polygon	1	Agrícola intensivo con cultivos anuales	106116.998899	4759615.69161	1
1	Polygon	2	Agropecuario extensivo con cultivos anuales	105815.914504	3639980.25913	2
2	Polygon	3	Antrópicas (sin cobertura vegetal)	30768.143681	433836.768179	3
3	Polygon	4	Áreas antrópicas (cultivos agrícolas) matorrales	30260.454324	978803.208268	4
4	Polygon	5	Bosque ralo mayormente caducifolio, transicional, montano	283684.61769	32386562.3502	5
5	Polygon	6	Bosque ralo mayormente siempre verde, transicional, montano	555896.525907	109454255.394	6
6	Polygon	7	Caminos	257419.87804	1282441.83193	7
7	Polygon	8	Cuerpos de Agua	1006.205085	7230.421633	8
8	Polygon	9	Frutales en secano (cultivos en hileras)	9417.685736	138573.861001	9
9	Polygon	10	Matorral ralo a semidenso, alto, xeromórfico, decido por sequía, montano Moderadamente degradado	92323.487409	3260573.11526	10
10	Polygon	11	Matorral ralo a semidenso, alto, xeromórfico, decido por sequía, montano Degradado a muy degradado	201151.254812	45472754.4711	11
11	Polygon	12	Suelos desnudos (deslizamientos)	15793.096352	157788.170534	12
12	Polygon	13	Vegas de río	447327.99622	3961550.37502	13
13	Polygon	14	Vegetación herbácea, graminoide baja, montano degradado a muy degradado	13729.616487	1028624.63561	14
14	Polygon	15	Vegetación herbácea, graminoide baja, montano Moderadamente degradado	166194.266397	17545289.6023	15
15	Polygon	16	Zonas urbanas	82439.583382	565492.559354	16

Fuente: Elaboración propia.

3.5 Tratamiento de los datos para la determinación del número de curva

El primer paso consiste en intersectar las entidades de uso de la tierra y grupos hidrológicos del suelo en ArcGIS para obtener un shapefile de polígonos llamado “CN_Poligonos”, en el cual cada polígono representa una única combinación de grupo hidrológico y uso de la tierra. Para generar esta entidad de polígonos, se utilizó el comando “Unión” en la ArcToolbox de ArcGIS.

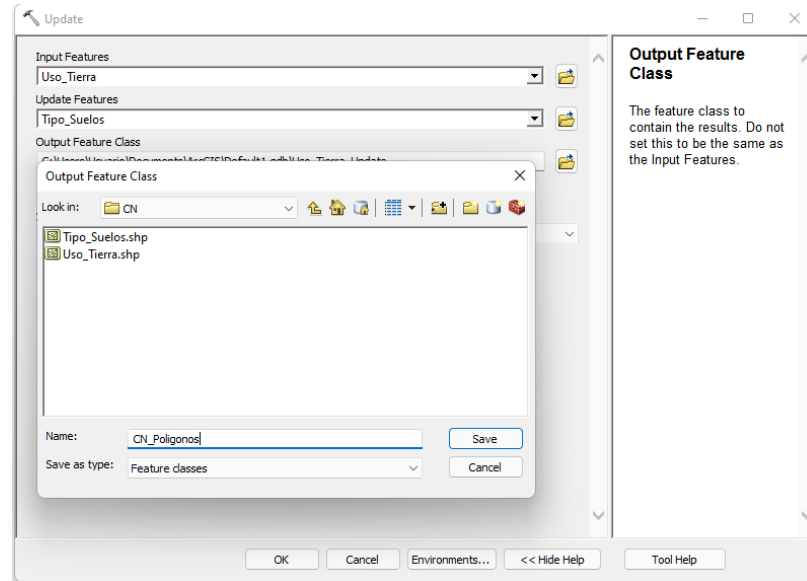
Gráfico 18. Comando Unión



Fuente: Elaboración propia.

Los datos de entrada para crear la entidad “CN_Poligonos” son “Uso_Tierra” y “Tipo_Suelos”, los cuales ya han sido creados y corregidos.

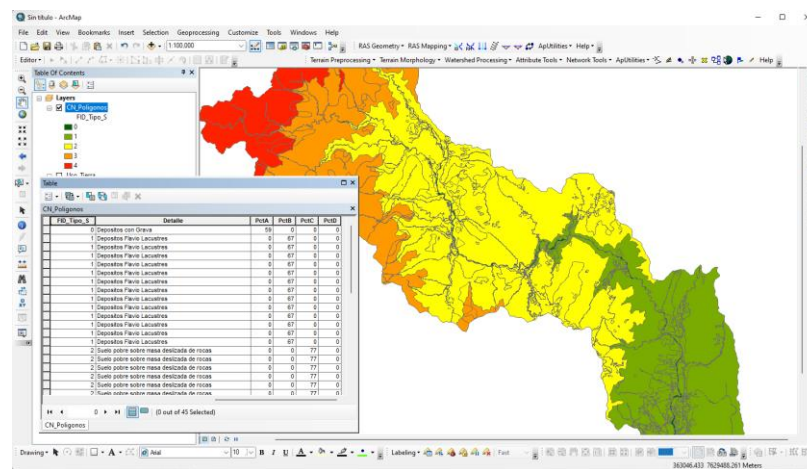
Gráfico 19. Fusionar las entidades “Uso_Tierra” y “Tipo_Suelos”



Fuente: Elaboración propia.

En el siguiente gráfico se puede observar las dos entidades fusionadas (uso de la tierra y tipo de suelos) en un solo shapefile.

Gráfico 20. Resultado de la unión



Fuente: Elaboración propia.

La columna Tipo_Suelos es el código para identificar el grupo hidrológico del suelo, los cuatro siguientes indican el porcentaje de cada grupo hidrológico del suelo y el último es un código para indicar el uso de la tierra. La ventaja de este método está en que se puede

considerar que un tipo de suelo está formado por una combinación de distintos grupos del suelo. La tabla de atributos de CN_Poligonos se verá de la siguiente forma.

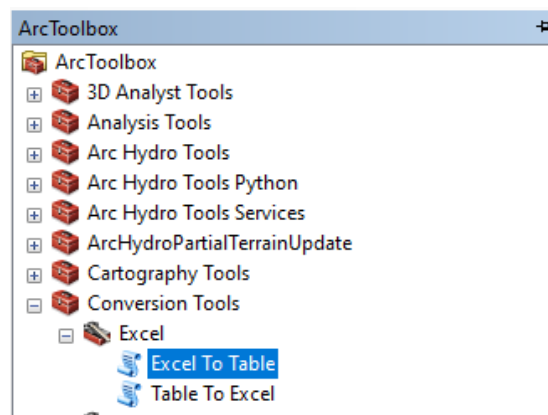
Gráfico 21. Tabla de atributos de la entidad CN_Poligonos

FID	Shape *	FID_Tipo_S	Detalle	PctA	PctB	PctC	PctD	Tipo_Suelo
1	Polygon	0	Depositos con Grava	59	0	0	0	A
2	Polygon	1	Depositos Flavio Lacustres	57	0	0	0	A
3	Polygon	1	Depositos Flavio Lacustres	57	0	0	0	A
4	Polygon	1	Depositos Flavio Lacustres	57	0	0	0	A
5	Polygon	1	Depositos Flavio Lacustres	57	0	0	0	A
6	Polygon	1	Depositos Flavio Lacustres	57	0	0	0	A
7	Polygon	1	Depositos Flavio Lacustres	57	0	0	0	A
8	Polygon	1	Depositos Flavio Lacustres	57	0	0	0	A
9	Polygon	1	Depositos Flavio Lacustres	57	0	0	0	A
10	Polygon	1	Depositos Flavio Lacustres	57	0	0	0	A
11	Polygon	1	Depositos Flavio Lacustres	57	0	0	0	A
12	Polygon	1	Depositos Flavio Lacustres	57	0	0	0	A
13	Polygon	1	Depositos Flavio Lacustres	57	0	0	0	A
14	Polygon	1	Depositos Flavio Lacustres	57	0	0	0	A
0	Polygon	2	Suelo pobre sobre masa deslizada de rocas	0	66	0	0	B
15	Polygon	2	Suelo pobre sobre masa deslizada de rocas	0	66	0	0	B
16	Polygon	2	Suelo pobre sobre masa deslizada de rocas	0	66	0	0	B
17	Polygon	2	Suelo pobre sobre masa deslizada de rocas	0	66	0	0	B
18	Polygon	2	Suelo pobre sobre masa deslizada de rocas	0	66	0	0	B

Fuente: Elaboración propia.

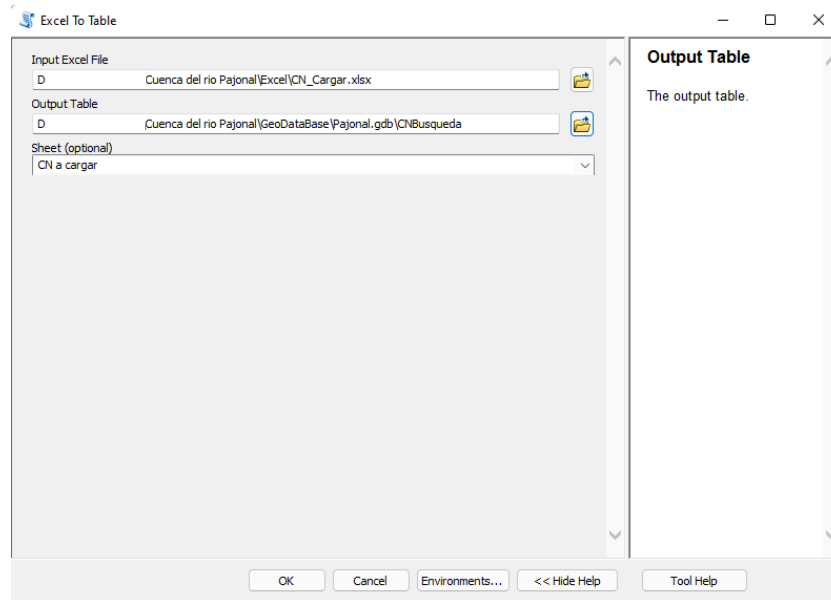
Creamos la tabla de búsqueda del número de curva a partir de los datos que se crearon en Excel que se muestra en la tabla 20, en ArcGIS, se le asigna el nombre de CNBúsqueda que se guarda como archivo “.dbf”.

Gráfico 22. Convertir el archivo Excel a una tabla



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 23. Datos de entrada para crear la tabla



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 24. Tabla creada como CNBúsqueda.dbf

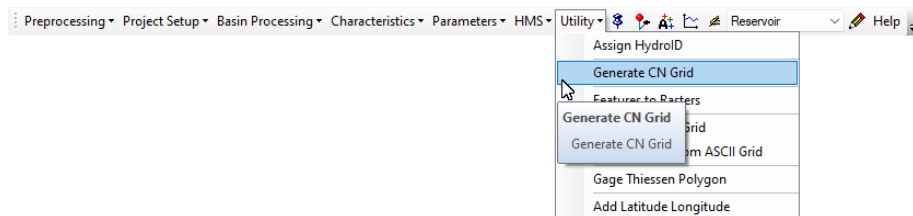
OBJECTID	N	Detalle	A	B	C	D	LUValue
1	1	Agrícola intensivo con cultivos anuales	62	71	78	81	1
2	2	Agropecuario extensivo con cultivos anuales	68	79	86	89	2
3	3	Antrópicas (sin cobertura vegetal)	57	71	80	85	3
4	4	Áreas antrópicas (cultivos agrícolas) matorrales	70	79	84	88	4
5	5	Bosque raro mayormente caducifolio, transicional, montano	45	66	77	78	5
6	6	Bosque raro mayormente siempre verde, transicional, montano	25	55	70	77	6
7	7	Caminos	72	82	87	89	7
8	8	Cuerpos de Agua	100	100	100	100	8
9	9	Frutales en secano (cultivos en hileras)	45	66	77	78	9
10	10	Matorral raro a semidenso, alto, xeromórfico, decíduo por sequía, montano Moderadamente degradado	47	67	81	88	10
11	11	Matorral raro a semidenso, alto, xeromórfico, decíduo por sequía, montano. Degradado a muy degradado	77	86	91	94	11
12	12	Suelos desnudos (deslizamientos)	72	82	87	89	12
13	13	Vegas de río	30	58	71	78	13
14	14	Vegetación herbácea, graminoides baja, montano degradado a muy degradado	68	79	86	89	14
15	15	Vegetación herbácea, graminoides baja, montano Moderadamente degradado	65	76	84	88	15
16	16	Zonas urbanas	74	84	90	92	16

Fuente: Elaboración propia

3.5.1 Cálculo del ráster del número de curva

Para realizar este paso debemos tener instalado el HEC-GeoHMS. Seleccionamos la opción “Utility” seguido de “Generate CN Grid”.

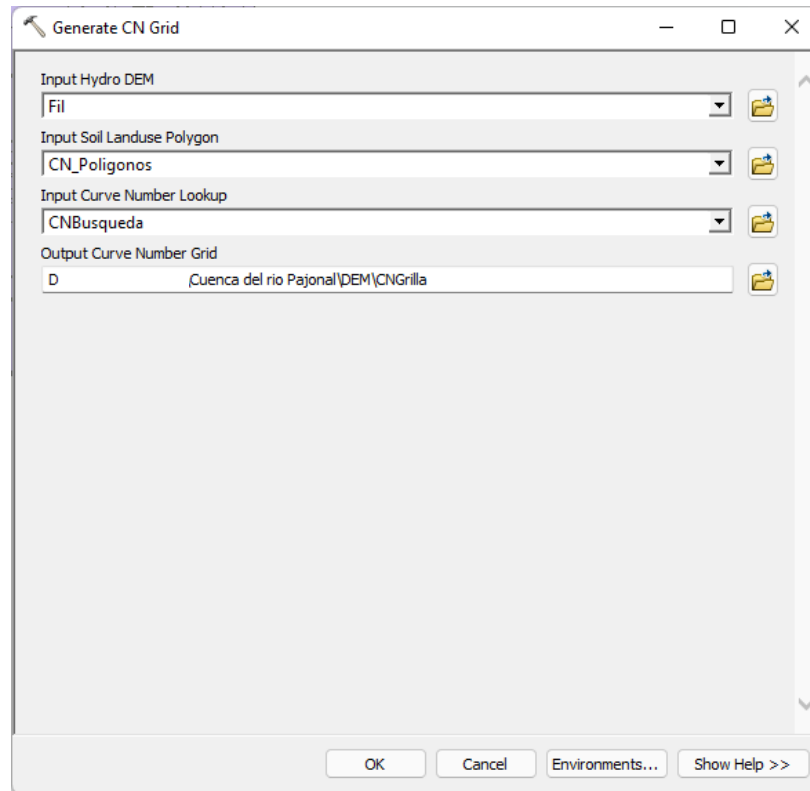
Gráfico 25. Menú de acceso para calcular el CN



Fuente: Elaboración propia

Se nos abre una ventana donde se debe ingresar el modelo digital de elevación corregido (para este caso se denomina Fil), el Shapefile “CN_Poligonos” y la tabla “CNBúsqueda” creados anteriormente.

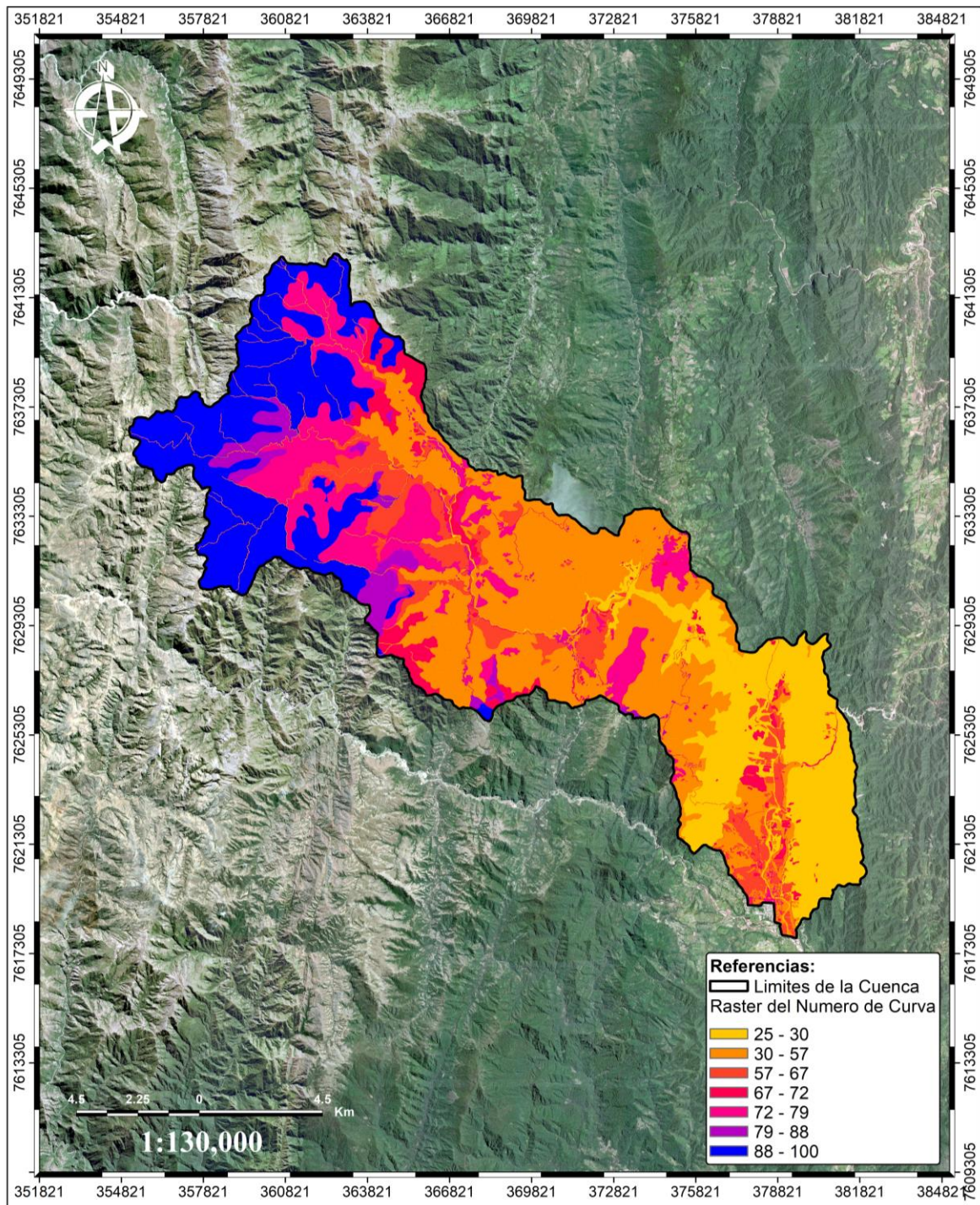
Gráfico 26. Datos a ingresar en la ventana Generate CN Grid



Fuente: Elaboración propia

Guardamos el archivo de salida como “CNgrilla”. El resultado es un ráster con un tamaño de pixel del modelo digital de elevación y tomando en cuenta las pendientes.

Mapa 15. Ráster del número de curva



Fuente: Elaboración propia

Si revisamos la tabla de atributos del shapefile CN_Poligonos, observamos una nueva columna con el valor del número de curva.

Gráfico 27. Tabla de atributos de la entidad CN_Poligonos

Uso_Suelos		CN	Area_km
Agrícola intensivo con cultivos anuales		62	3.725105
Agrícola intensivo con cultivos anuales		71	1.03451
Agropecuario extensivo con cultivos anuales		68	1.719766
Agropecuario extensivo con cultivos anuales		79	1.920214
Antrópicas (sin cobertura vegetal)		57	0.152762
Antrópicas (sin cobertura vegetal)		71	0.281074
Áreas antrópicas (cultivos agrícolas) matorrales		70	0.424447
Áreas antrópicas (cultivos agrícolas) matorrales		79	0.554356
Bosque ralo mayormente caducifolio, transicional, montano		45	3.667745
Bosque ralo mayormente caducifolio, transicional, montano		66	11.882272
Bosque ralo mayormente caducifolio, transicional, montano		77	15.801985
Bosque ralo mayormente caducifolio, transicional, montano		78	1.03456
Bosque ralo mayormente caducifolio, transicional, montano		66	0
Bosque ralo mayormente siempre verde, transicional, montano		25	40.284929
Bosque ralo mayormente siempre verde, transicional, montano		55	62.264627
Bosque ralo mayormente siempre verde, transicional, montano		70	6.9047
Bosque ralo mayormente siempre verde, transicional, montano		55	0
Caminos		72	0.619396
Caminos		82	0.617764

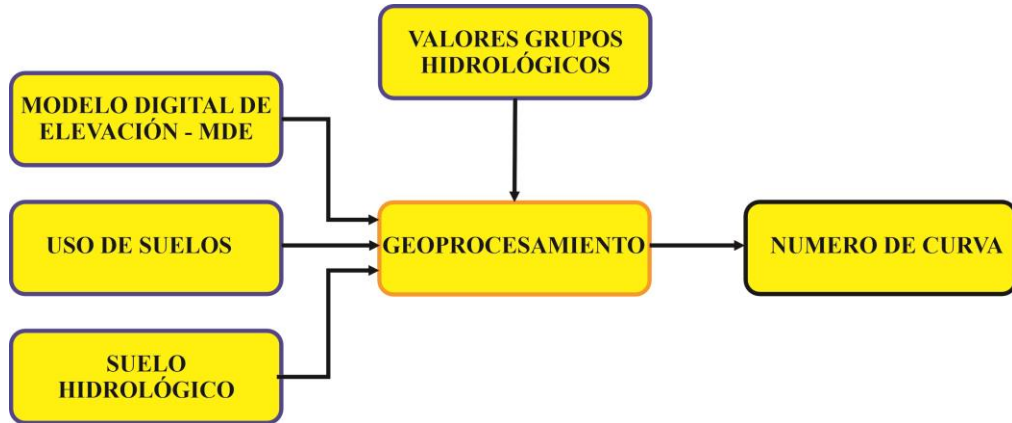
Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO 4:

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Todo el proceso de geoprocresamiento para obtener el número de curva se resume en el siguiente organigrama.

Figura 6. Modelo conceptual para obtener el número de curva



Fuente: Elaboración propia

Se calcula el número de curva para la cuenca de drenaje, ponderando el área de los polígonos de cada grupo de uso del suelo dentro de los límites del área de drenaje. La ecuación básica para el cálculo del número de curva es la siguiente:

$$CN_{aw} = \frac{\sum_{i=1}^n (CN_i * A_i)}{\sum_{i=1}^n A_i}$$

Donde:

CN_{aw} = El número de curva ponderado por área para la cuenca de drenaje;

CN_i = El número de curva para cada polígono de grupo de uso del suelo;

A_i = El área de cada polígono de grupo de uso del suelo;

n = Número de polígonos de uso del suelo en cada cuenca de drenaje.

Para aplicar la ecuación, agregamos un nuevo campo en la tabla de atributos del archivo CN_Poligonos con el nombre de CN_Pol_Área que se va a rellenar con el resultado de multiplicar el CN*Área, sumamos todos los productos y lo dividimos por la sumatoria del área (área de la cuenca). El resultado es el siguiente:

Tabla 21. Resultados del proceso

N	Detalle	CN	Área km ²	CN*Área	CN Final
1	Agrícola intensivo con cultivos anuales	62	3.725	230.96	62.07
2	Agrícola intensivo con cultivos anuales	71	1.035	73.45	
3	Agropecuario extensivo con cultivos anuales	68	1.720	116.94	
4	Agropecuario extensivo con cultivos anuales	79	1.920	151.70	
5	Antrópicas (sin cobertura vegetal)	57	0.153	8.71	
6	Antrópicas (sin cobertura vegetal)	71	0.281	19.96	
7	Áreas antrópicas (cultivos agrícolas) matorrales	70	0.424	29.71	
8	Áreas antrópicas (cultivos agrícolas) matorrales	79	0.554	43.79	
9	Bosque ralo mayormente caducifolio, transicional, montano	45	3.668	165.05	
10	Bosque ralo mayormente caducifolio, transicional, montano	66	11.882	784.23	
11	Bosque ralo mayormente caducifolio, transicional, montano	77	15.802	1216.75	
12	Bosque ralo mayormente caducifolio, transicional, montano	78	1.035	80.70	
13	Bosque ralo mayormente siempre verde, transicional, montano	25	40.285	1007.12	
14	Bosque ralo mayormente siempre verde, transicional, montano	55	62.265	3424.55	
15	Bosque ralo mayormente siempre verde, transicional, montano	70	6.905	483.33	
16	Caminos	72	0.619	44.60	
17	Caminos	82	0.618	50.66	
18	Caminos	87	0.045	3.94	
19	Cuerpos de agua	100	0.007	0.65	
20	Cuerpos de agua	100	0.001	0.07	
21	Frutales en secano (cultivos en hileras)	45	0.059	2.65	
22	Frutales en secano (cultivos en hileras)	66	0.080	5.27	
23	Matorral ralo a semidenso, alto, xeromórfico, deciduo por sequía, montano moderadamente degradado	47	1.575	74.03	
24	Matorral ralo a semidenso, alto, xeromórfico, deciduo por sequía, montano moderadamente degradado	67	1.685	112.93	
25	Matorral ralo a semidenso, alto, xeromórfico, deciduo por sequía, montano degradado a muy degradado	86	0.825	70.97	
26	Matorral ralo a semidenso, alto, xeromórfico, deciduo por sequía, montano degradado a muy degradado	91	20.602	1874.77	
27	Matorral ralo a semidenso, alto, xeromórfico, deciduo por sequía, montano degradado a muy degradado	94	24.046	2260.30	
28	Suelos desnudos (deslizamientos)	72	0.085	6.13	
29	Suelos desnudos (deslizamientos)	82	0.073	5.95	
30	Vegas de río	30	3.962	118.85	
31	Vegetación herbácea, graminoide baja, montano degradado a muy degradado	79	0.617	48.71	
32	Vegetación herbácea, graminoide baja, montano degradado a muy degradado	86	0.412	35.43	
33	Vegetación herbácea, graminoide baja, montano moderadamente degradado	65	1.574	102.31	
34	Vegetación herbácea, graminoide baja, montano moderadamente degradado	76	9.278	705.10	
35	Vegetación herbácea, graminoide baja, montano moderadamente degradado	84	5.329	447.63	
36	Vegetación herbácea, graminoide baja, montano moderadamente degradado	88	1.365	120.10	
37	Zonas urbanas	74	0.472	34.94	
38	Zonas urbanas	84	0.093	7.84	
TOTAL			225.07	13970.76	

Fuente: Elaboración propia

Por último, el CN de la cuenca es:

$$CN = \frac{13970.76}{225.07} = 62.07$$

De esta forma, estimamos el número de curva de una cuenca con el uso de sistemas de información geográfica. Se espera que haya sido de utilidad para la realización de modelos, lluvia-escorrentía o para llevar a cabo un balance hídrico.

CAPÍTULO 5:
COMPARACIÓN DEL
COEFICIENTE DEL NÚMERO
DE CURVA

5.1 Comparación con cuencas próximas

La primera comparación del coeficiente del número de curva calculado para la cuenca del río Pajonal, se realizó comparando los valores con dos estudios previos realizados por la “Oficina Técnica Nacional de los ríos Pilcomayo y Bermejo” en dos cuencas próximas a la cuenca del río Pajonal. Estos estudios fueron llevados a cabo por la empresa “Consultora y Constructora: Río Nuevo”.

1. Manejo Integral Microcuenca del río Salinas municipio de Entre Ríos - Tarija, enero del 2021.
2. Manejo Integral Microcuenca del río Serere municipio de Entre Ríos - Tarija, septiembre del 2022.

En la siguiente tabla se puede ver que las tres cuencas se encuentran prácticamente en el mismo nivel altitudinal.

Tabla 22. Niveles altitudinales

Cuenca	Altura máxima	Altura mínima	Altura media
Río Pajonal	3421	1235	2005.38
Río Salinas	1881	1121	1376.86
Río Serere	2033	978	1385.31

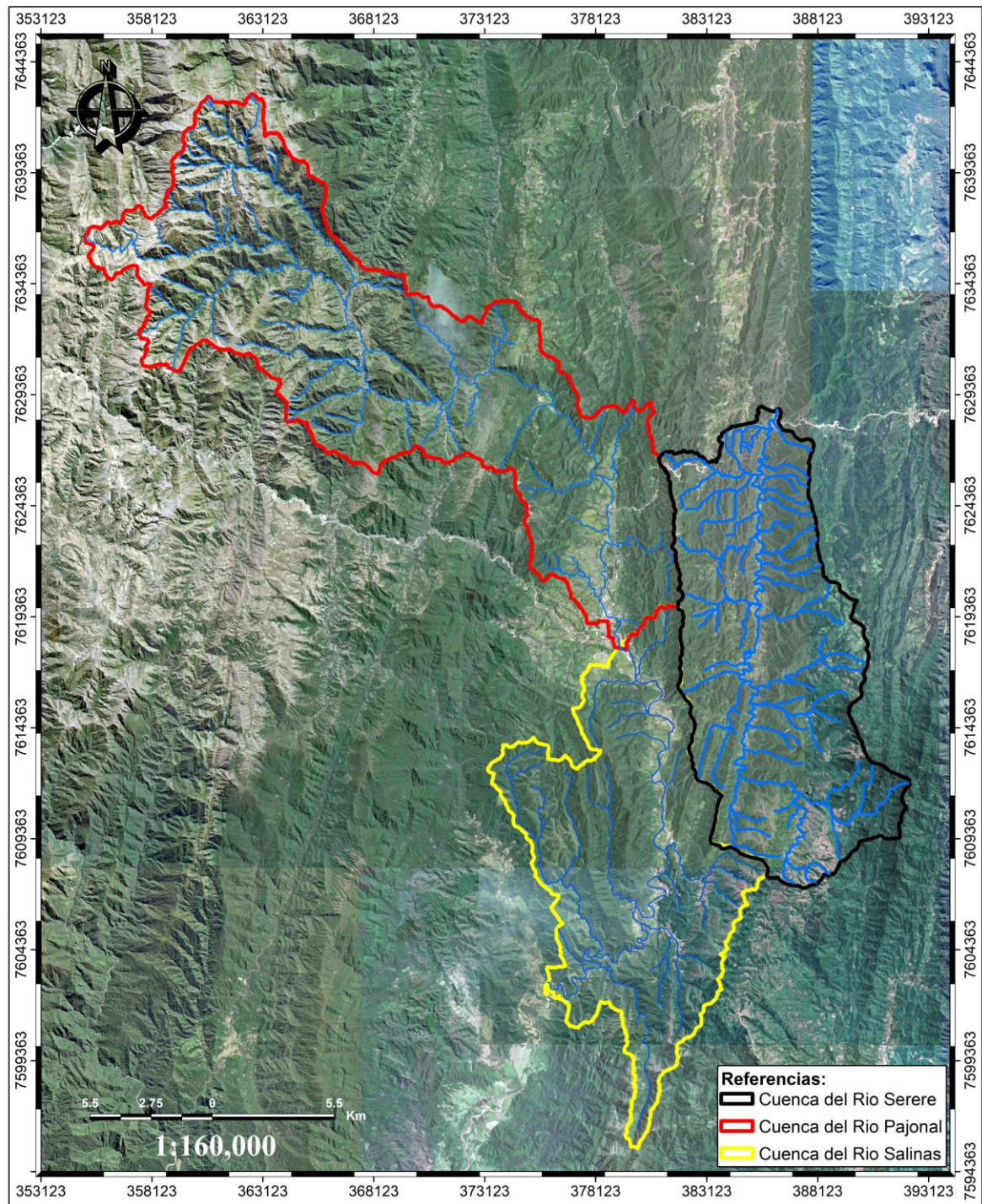
Fuente: Elaboración propia

Las cuencas del río Salinas y del río Serere poseen el mismo tipo de cobertura del suelo que la cuenca del río Pajonal. Además, las tres cuencas comparten las mismas estaciones meteorológicas, seleccionadas en base a criterios de mayor disponibilidad de datos y proximidad al área de estudio. Según el manual de hidrología de la FAO, pueden utilizarse estaciones dentro de un radio de 50 km circundantes a la unidad hidrográfica en estudio.

La ubicación espacial de las tres cuencas hace que el tipo de cobertura del suelo sea casi similar en toda su extensión, existiendo muy poca variabilidad. Teniendo en cuenta estos factores, se consideró conveniente tomar los datos de los números de curva del río Salinas y del río Serere para comparar con el valor obtenido para el río Pajonal.

En el mapa de abajo se puede observar que las tres cuencas son colindantes. Además, las cuencas del río Pajonal y el río Salinas se encuentran en la misma unidad hidrográfica 85894, mientras que la cuenca del río Serere se encuentra en la unidad hidrográfica 86594.

Mapa 16. Cuencas del río Pajonal, del río Salinas y del río Serere



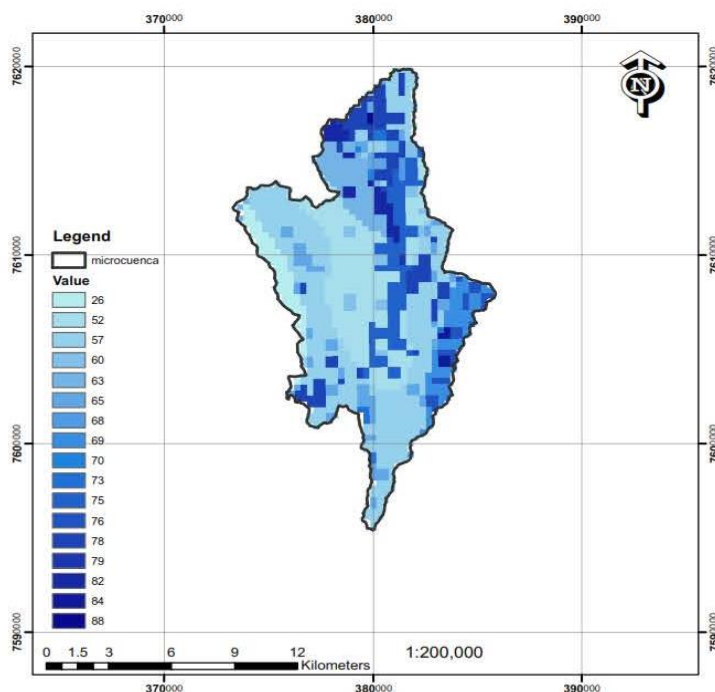
Fuente: Elaboración propia

El valor calculado del número de curva para la cuenca del río Salinas es de 60.96. Esta cuenca tiene un área de 135.54 km².

Gráfico 28. Datos del número de curva del río Salinas

CN_MIC SALINAS

Nº	CN	COUNT	COUNT %	CN x COUNT %
1	26	64	4.28%	1.11
2	52	276	18.45%	9.59
3	57	509	34.02%	19.39
4	60	34	2.27%	1.36
5	63	90	6.02%	3.79
6	65	105	7.02%	4.56
7	68	4	0.27%	0.18
8	69	73	4.88%	3.37
9	70	3	0.20%	0.14
10	73	11	0.74%	0.54
11	75	118	7.89%	5.92
12	76	30	2.01%	1.52
13	78	131	8.76%	6.83
14	79	2	0.13%	0.11
15	82	37	2.47%	2.03
16	84	7	0.47%	0.39
17	88	2	0.13%	0.12
	Σ =	1496	100.00%	60.96
CN pond = 60.96				



Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 20S
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: WGS 1984
 False Easting: 500,000.0000
 False Northing: 10,000,000.0000
 Central Meridian: -63.0000
 Scale Factor: 0.9996
 Latitude Of Origin: 0.0000
 Units: Meter

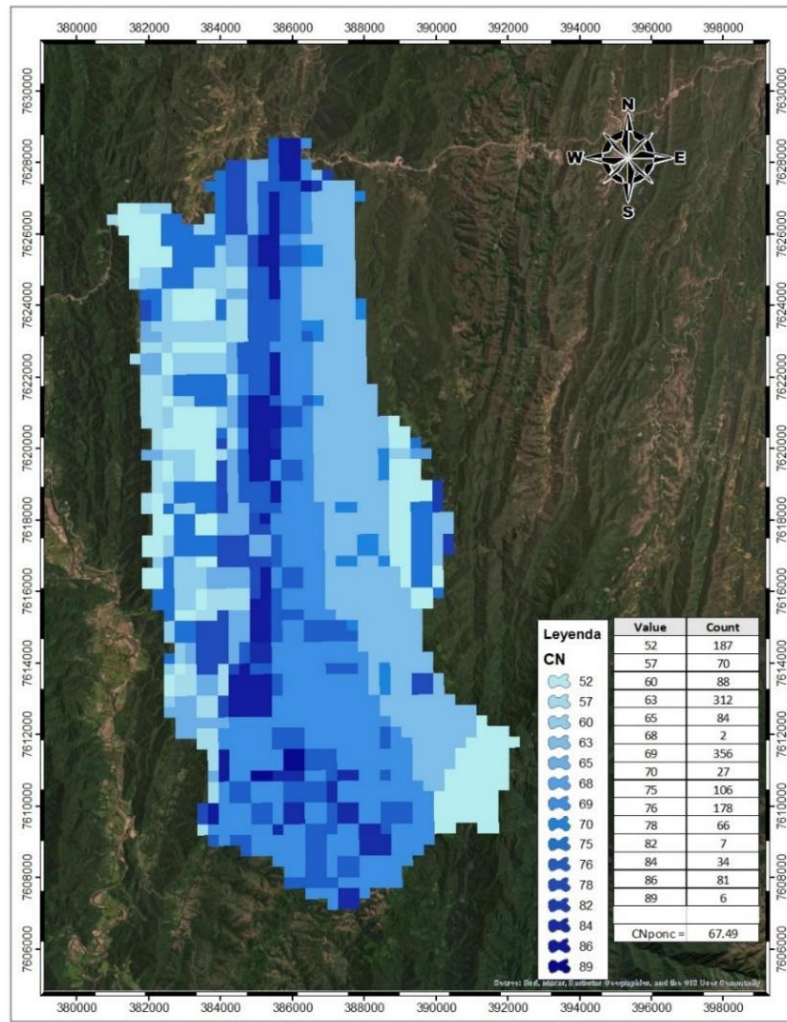
CN pond = 60.96

Fuente: Manejo integral microcuenca del río Salinas municipio de Entre Ríos – Tarija de Consultora y Constructora Río Nuevo, 2021

El valor calculado del número de curva para la cuenca del río Serere es de 67.49. Esta cuenca tiene un área de 143.88 km².

Gráfico 29. Datos del número de curva del río Serere

CN	52	57	60	63	65	68	69	70	75	76	78	82	84	86	89	CNpond
Nº	187	70	88	312	84	2	356	27	106	178	66	7	34	81	6	67.49



Fuente: Manejo integral microcuenca del río Serere municipio de Entre Ríos – Tarija de Consultora y Constructora Río Nuevo, 2022

En la siguiente tabla se resumen los coeficientes del número de curva de las tres cuencas. Los valores son muy similares, con variaciones mínimas.

Tabla 23. Resumen de los valores del número de curva

	Río Pajonal	Río Salinas	Río Serere
Número de curva	62.07	60.96	67.49

Fuente: Elaboración propia

La comparación de los resultados se justifica por cuatro razones fundamentales:

1. La orografía de la cuenca del río Pajonal es similar a las cuencas del río Serere y Salinas.
2. Las tres cuencas se encuentran casi en el mismo piso ecológico.
3. Las tres cuencas son adyacentes y las cuencas del río Pajonal y el río Salinas se encuentran en la misma unidad hidrográfica.
4. Los valores obtenidos de las tres cuencas son casi similares con algunas variaciones. Estas variaciones se pueden atribuir a diferentes causas:
 - a) Marcada sensibilidad a la elección del número de la curva (tablas del NRCS).
 - b) Ausencia de una guía clara sobre cómo variar la condición de humedad antecedente.
 - c) Precisión variable del método para diferentes biomas (uso de suelos).
 - d) Ausencia de una manera explícita para tomar en cuenta los efectos de escala espacial.

Se omitió la comparación con el número de curva global con resolución de 250 m por dos razones:

1. El tamaño de píxel es grande, lo que implica que el número de curva proporcionado por esta grilla es únicamente para consulta y tiene grandes variaciones.
2. Dado que se disponía del número de curva de dos cuencas cercanas (río Salinas y río Serere) con tamaños de píxel más reducidos (10 m), se consideró más conveniente realizar la comparación con estos datos, como se explicó anteriormente.

5.2 Cálculo de tirantes y comparación con marcas altas de agua

La segunda comparación del coeficiente del número de curva calculado para la cuenca del río Pajonal se realizó comparando el tirante con las marcas altas de agua registradas en el cierre de la cuenca (puente Salinas).

Primero, se calcularon los volúmenes de agua de aporte de la cuenca utilizando el coeficiente del número de curva, detallado en el “Anexo 3”. Los hidrogramas se obtuvieron utilizando el software HEC-HMS, considerando tres periodos de retorno de 25, 50 y 100 años (con probabilidades de ocurrencia del 4%, 2% y 1%, respectivamente).

Luego se armó un modelo usando el software de HEC-RAS, el detalle de este trabajo se encuentra en el “Anexo 4”. La simulación se realizó para la probabilidad de ocurrencia del 1% (100 años), los tirantes que se registraron para este periodo de retorno se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 24. Tirantes calculados con HEC-RAS

Tirantes calculados en el puente Salinas de Entre Ríos		
Periodo de retorno de 100 años (1%)		
Perfil	Caudal máximo (m³/segundo)	Valor del tirante (m)
Estribo izquierdo del puente	255.5	3.29
Estribo derecho del puente	255.5	3.26
Tirante en el pilar del puente	255.5	3.11

Fuente: Elaboración propia

Los valores calculados con HEC-RAS en un modelo 2D se aproximan a la marca alta de agua del puente de 3.40 metros, esta diferencia puede ser por la presencia de escombros en las proximidades del pilar o los estribos del puente que producen un resalto hidráulico y como consecuencia una subida en el tirante de la lámina del agua.

Foto 1. Marca alta de agua en el puente Salinas



Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO 6:
CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

En este trabajo de investigación, el número de curva de escorrentía del NRCS para la cuenca del río Pajonal se estimó mediante la integración del mapa de uso del suelo, obtenido a partir de imágenes de teledetección, y los datos hidrológicos del suelo en un entorno de Sistemas de Información Geográfica (SIG). A continuación, el número de curva estimado se comparó utilizando datos de precipitación y escorrentía. Sobre la base de este trabajo, se extraen las siguientes conclusiones.

- El método del número de curva de escorrentía del NRCS tiene sus ventajas obvias: simplicidad, previsibilidad, estabilidad, capacidad de respuesta a las principales propiedades de la cuenca productora de escorrentía y dependencia de un solo parámetro, el número de curva. El número de curva de escorrentía del NRCS para una AMC II (condiciones medias) de la cuenca del río Pajonal se estimó en 62.07, lo cual genera un caudal para un periodo de retorno de 100 años de $255.5 \text{ m}^3/\text{s}$.
- El uso de técnicas de teledetección para determinar el uso de suelos y los grupos hidrológicos del suelo no sólo ahorra tiempo, sino que es menos costoso que los métodos convencionales. Además, la teledetección por satélite tiene ventajas como la cobertura de grandes áreas, la visión sinóptica y la capacidad de proporcionar información sobre regiones accesibles e inaccesibles. Sin embargo, el éxito de la técnica de teledetección depende de la interpretación precisa del terreno.
- Las clases de uso de suelos interpretadas a partir de datos de teledetección por satélite son más generalizadas en comparación con el estudio sobre el terreno. Por lo tanto, es necesario desarrollar clases de uso del suelo más generalizadas, adecuadas para los datos de teledetección en el método del número de curva.
- Los SIG son una herramienta poderosa para integrar los datos de uso y cobertura del suelo con los datos hidrológicos del suelo para el cálculo de áreas bajo diferentes categorías.
- No es posible clasificar manualmente la escorrentía de toda la cuenca. El cálculo del número de curva en SIG ha resultado ser relativamente fácil. Los parámetros hidrológicos, como el uso del suelo y grupos hidrológicos del suelo, se calculan utilizando datos de teledetección. La tecnología de teledetección ha sido de gran valor para facilitar en gran medida el método convencional en los estudios de

precipitación-escorrentía. El número de curva del NRCS incorporado a los Sistemas de Información Geográfica (SIG) hace que el proceso sea preciso y rápido. La teledetección y los sistemas de información geográfica ofrecen la posibilidad de aumentar el detalle espacial tanto en la descripción como en la resolución de la imagen.

- El presente trabajo de investigación también demuestra la importancia de las técnicas de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y teledetección, y su utilidad para la delimitación de la cuenca hidrográfica del río Pajonal. Este trabajo también presenta un método fiable para calcular los valores del número de curva, combinando el uso del suelo y el grupo hidrológico del suelo. Los valores del número de curva de la cuenca del río Pajonal se sitúan entre 25 y 100. Los resultados mostraron que un número de curva de 100 indica agua superficial. Los números de curva altos (71 - 100) corresponden a zonas urbanizadas y paisajes rocosos, lo que indica una escorrentía elevada y una baja infiltración; mientras que los números de curva bajos (25 - 70), correspondientes a zonas boscosas y cultivos, indican una escorrentía baja y una alta tasa de infiltración.
- En la cuenca del río Pajonal, la mayor parte del territorio presenta valores bajos del número de curva (25-70), cubriendo un área de 139.96 km², lo que representa el 62.18% del área de estudio. Esto indica condiciones favorables para la infiltración. En contraste, la otra parte de la cuenca tiene valores altos a muy altos del número de curva (71-100), abarcando un área de 85.11 km², que corresponde al 37.82% de la zona. Esta situación produce escorrentías mayores que la infiltración. La escorrentía sin control conduce a la degradación de los recursos naturales, como el suelo y el agua, y finalmente propicia la desertificación
- Con esta investigación se demuestra que la información disponible permite aplicar la teoría del número de curva en la cuenca del río Pajonal, en el departamento de Tarija, por lo que debería replicarse en otras cuencas hidrográficas del departamento. Las futuras investigaciones pueden enfocarse en el estudio de las variaciones espaciotemporales del número de curva, aprovechando la capacidad de los sensores remotos para capturar los cambios que ocurren en la superficie terrestre.

- Según el uso del suelo en la cuenca, predominan los tipos de conservación y protección, agrícola y pecuario, y los grupos hidrológicos de suelo tipo B, C y D. Esto indica que la cuenca tiene suelos con capacidad de escorrentía moderadamente alta y moderadamente baja, respectivamente.
- El número de curva obtenido se comparó de dos formas. Primero, se comparó con dos coeficientes de estudios previos cercanos al área de estudio (río Salinas y río Serere). Los resultados obtenidos en este trabajo están relacionados con los coeficientes obtenidos en estos estudios. Segundo, se calcularon los hidrogramas de flujo de escorrentía de la cuenca utilizando HEC-HMS con el valor del número de curva obtenido. Con estos volúmenes de caudal, se generaron tirantes utilizando HEC-RAS y posteriormente se compararon con las marcas altas de agua que se registraron en el puente Salinas. Se pudo verificar que existe similitud con el tirante calculado.
- La delimitación del tipo de suelos de la cuenca del río Pajonal se basó en el mapa de tipos de suelos del municipio de Entre Ríos, encontrado en el “Plan Territorial de Desarrollo Integral para Vivir Bien del Municipio de Entre Ríos 2021-2025” y el “Plan de Desarrollo Municipal Entre Ríos 2021-2025”. Tomando como referencia los tipos de suelos presentes en el municipio, se elaboró un mapa más detallado para la cuenca del río Pajonal.
- El caudal específico para la cuenca del río Pajonal se estimó en $1.13 \text{ m}^3/\text{s} \times \text{km}^2$. Al compararlo con los caudales específicos de la cuenca del río Salinas y del río Serere, cuyos valores son de $1.11 \text{ m}^3/\text{s} \times \text{km}^2$ y $1.57 \text{ m}^3/\text{s} \times \text{km}^2$ respectivamente, se observa que la magnitud del evento es aceptable para la cuenca del río Pajonal.

6.2 Recomendaciones

- Se debe trabajar con fotografías satelitales que tengan un menor porcentaje de nubosidad en el área de estudio, ya que esto ayudará a identificar mejor las superficies de cobertura vegetal. Las regiones con nubosidad interfieren en la identificación precisa del tipo de vegetación.
- El número de curva ha encontrado una aplicación fructífera en los sistemas de información geográfica. Definiendo la cobertura a partir de datos obtenidos por teledetección y utilizando la información existente sobre suelos basada en sistemas de información geográfica, el número de curva se determina de manera más rápida y con menos errores en los cálculos mediante la consulta de tablas.
- El uso y la ocupación del suelo son parámetros importantes para el cálculo del coeficiente del número de curva. Por lo tanto, es fundamental identificar con detalle cada área de uso del suelo.
- Se recomienda que los archivos “shapefile” tanto del uso de suelos como del tipo de suelos, sean revisados topológicamente para eliminar errores de superposición y vacíos entre polígonos adyacentes. Estos errores, en muchos casos, pueden causar problemas al calcular el número de curva.
- Se recomienda instalar una estación hidrometeorológica automática en la cuenca del río Pajonal para recopilar datos precisos y en tiempo real. Esto mejorará la modelación hidrológica y la gestión de recursos hídricos, además de contribuir a la validación y calibración de modelos hidrológicos, incrementando la precisión en la estimación del número de curva.
- Además de la estación automática, es fundamental la instalación de un pluviógrafo en puntos estratégicos de la cuenca. Un pluviógrafo proporciona un registro detallado de la intensidad y duración de las precipitaciones, información crucial para analizar eventos extremos y su impacto en la cuenca.
- Es crucial implementar un sistema regular de medición de caudales máximos en el río Pajonal. La ausencia de datos históricos sobre estos caudales ha sido una limitación importante. Estos datos son fundamentales para la calibración de modelos hidrológicos y la validación del número de curva, asegurando una mayor precisión en las predicciones.