

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

Los recursos hídricos son esenciales en el desarrollo de las ciudades y poblaciones, puesto que en torno a ellos se busca bienestar y calidad de vida para los habitantes que la conforman, por lo que un buen manejo de los recursos a nivel de cuenca hidrográfica debe estar soportado por un estudio de los procesos hidrológicos que ocurren en ella. (Nieto y Uscategui, 2015, p. 8)

Por esta razón la cobertura vegetal presente en una cuenca hidrográfica constituye un elemento importante en la regulación de caudales, ya que entre otras funciones controla la generación de inundaciones. Considerando lo anterior, es indispensable conservar y mantener las coberturas naturales. (Calderón y Carvajal, 2019, p. 2)

También podemos decir que la cobertura vegetal muerta cumple una función importante sobre el suelo reduce considerablemente la velocidad de la escorrentía y el impacto de las gotas de lluvias para reducir la erosión del suelo y evitar el arrastre de sedimentos que podrían dañar estructuras hidráulicas que están aguas abajo.

Para poder estudiar la influencia de la cobertura vegetal en los caudales, se tomó en cuenta como zona de estudio la cuenca alta del río Guadalquivir porque es una de las fuentes de aprovechamiento de la población y comunidades del Valle Central de Tarija, por esta razón se la debe cuidar de manera constante y tomar sus respectivas precauciones, es aquí donde el papel de la cobertura vegetal es muy importante en la regulación de caudales y de erosiones.

1.2 Antecedentes

El cambio de cobertura vegetal durante el tiempo se aprecia cambios considerables ya que va afectada directa con los caudales, también a otros parámetros, pero en este estudio se verá cómo afecta en la generación de caudales que provocan sequías y también inundaciones por tal razón es importante ver el cambio de cobertura vegetal es tal razón

que se hacen diferentes estudios del cambio de cobertura vegetal en diferentes lugares del mundo y del país.

En la cuenca hidrográfica de Sardinita, en Bogotá, Colombia se verificó por medio de un análisis multitemporal los cambios de cobertura vegetal en los años 2000 y 2012, posteriormente se realizó el procesamiento y modelación de datos hidrológicos para determinar la influencia que ha tenido la variación de la coberturas en la generación de caudales pico, se pudo observar que si bien la escorrentía aumentó en la cuenca con la variación de la cobertura no es tan significativa para la generación de caudales pico (Calderón y Carvajal, 2019, p. 1).

En el estudio de la micro cuenca del río Bobo en la provincia del Carchi, Colombia, se puede evidenciar el aumento de superficie agrícola y la disminución de la cobertura natural. El objetivo de la investigación fue la aplicación del modelo SWAT como herramienta principal para el manejo de recursos hídricos, se compararon caudales y sedimento durante 18 años, se tomó variables tipo de suelo, pendientes, cobertura vegetal y clima para luego proponer un manejo de los recursos hídricos. Los resultados obtenidos indicaron que para los sedimentos a medida que la cobertura vegetal disminuye a través del tiempo, se observa que los sedimentos aumentan, siendo para el año 2002 de 0,06 Ton/ha/d, para el año 2015 de 0,45 Ton/ha/d, para el año 2020 de 0,55 Ton/ha/d, debido a que, al no haber cobertura, las raíces de los árboles que son las que mantienen las partículas de suelo en su lugar, se desprenden y las tasas de pérdida de suelo aumentan significativamente.

En cuanto a los caudales en el escenario actual (2015) se evidencia reducción de páramo, bosque y vegetación arbustiva, en comparación al escenario pasado (2002) y al no haber dicha cobertura, el agua de lluvia va directo al río, el caudal aumenta. Para el escenario futuro (2020) el caudal reducirá debido a que la precipitación será menor, e inclusive un estudio sobre calentamiento global, menciona que el aumento de temperatura en 1°C será igual a la reducción de caudal de agua en un 20%. Con los resultados obtenidos se plantea la propuesta de manejo del recurso hídrico para la microcuenca del río Bobo. (Terán, 2016)

El estudio que se realizó en el municipio de Patacamaya, La Paz (Bolivia) de evaluación de cambio multitemporal de la cobertura vegetal para poder caracterizar

multitemporalmente el sistema climático durante 39 años en el altiplano central de Bolivia.

Se utilizaron imágenes Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM, Landsat 8 OLI_TIRS, para la interpretación y clasificación no supervisada de la cobertura de suelos de los años correspondientes, así mismo las para la caracterización de coberturas nativas también coberturas vegetal es producidas por el hombre, esta clasificación se basa en la dinámica de la cobertura vegetal y la no vegetal cuerpos de agua y clase de suelo desnudo.

Seguidamente, se refuerza con información cartográfica, geológica y de ubicación de pozos de agua subterránea para cruzar en un Sistema de Información Espacial Geográfica, para optimizar los recursos de los acuíferos en el riego, determinando el comportamiento de la cobertura vegetal inducida por el hombre y la cobertura vegetal sucesional en la distribución de las aguas subterráneas de las zonas de recarga. (Balboa, 2017).

Utilizando el modelo digital de elevación de (MDE) a 30 m y transponiendo con la imagen digital Landsat se obtuvo las pendientes respectivas del área de estudio. Determinando la distribución de pendientes según FAO (2009). (Balboa, 2017, p. 74).

1.3 Alcance

El presente estudio es dirigido a toda la población de la ciudad de Tarija que pretende brindar información del comportamiento de los caudales con la variación de la cobertura vegetal y usos de suelos en un análisis multitemporal. Se utilizó el modelo SWAT para este presente estudio, se tomará en cuenta para el análisis los periodos 2001, 2010 y 2021, ya que para estos periodos existe información oficial de cobertura vegetal y uso de suelo para este presente estudio.

1.4 Justificación de la investigación

Uno de los parámetros para la generación de caudales a través de los modelos hidrológicos es el dato de la cobertura vegetal, por esta razón el presente trabajo pretende estudiar los diferentes escenarios de caudales de la cuenca Alta del río Guadalquivir, para determinar la influencia que tiene la cobertura vegetal de una superficie al momento de existir o generarse caudales producto de las precipitaciones en diferentes periodos de años

en la cuenca de estudio, este estudio me permitirá analizar las consecuencias que puede generar la deforestación y la erosión de los suelos en nuestro medio y como podrían influir en nuestro diario vivir ya que el agua es el elemento básico para nuestra subsistencia.

1.5 Planteamiento del problema

La cobertura vegetal juega un papel importante en la estabilidad hídrica, influye en el proceso de regulación de los caudales en cuencas hidrográficas, puesto que frena y rige la escorrentía superficial, por tal razón la tasa de infiltración incrementa de esta manera los acuíferos se recargan.

Para las cuencas hidrográficas es muy importante el estudio de la cobertura vegetal ya que el efecto de deforestación se resume en la reducción de caudales medios y aumenta los caudales extremos lo que provoca inundaciones y sequías.

Es aquí donde surge el interés del estudio de los cambios de cobertura vegetal con relación a la variación de caudales, la cual está siendo afectada de manera constante. Lo que provoca erosiones, crecientes súbitos de caudales y sequias, por esta razón lo que se busca es la verificación de la relación que tiene la cobertura vegetal con los caudales para la cuenca Alta del río Guadalquivir.

1.6 Formulación del problema

¿Cuál es la influencia de la cobertura vegetal sobre la generación de caudales y de qué manera afecta su variabilidad en el tiempo en la cuenca Alta del río Guadalquivir?

1.7 Hipótesis

El cambio de la cobertura vegetal en el paso del tiempo provoca una variación del 5% en la generación de caudales en la cuenca alta del río Guadalquivir.

1.8 Objetivos

1.8.1 Objetivo general

Analizar la influencia de la cobertura vegetal en la generación de caudales, a través de un análisis multitemporal para obtener la variación de caudales, aplicando el modelo SWAT en la cuenca Alta del río Guadalquivir.

1.8.2 Objetivos específicos

- Determinar la variación de cobertura vegetal en diferentes periodos de tiempo a partir del procesamiento y análisis de las imágenes cartográficas existentes para el análisis de la variación de los caudales de la cuenca en estudio.
- Realizar un estudio del balance hídrico y dichas características a partir de datos procesados, este modelado tiene el fin de detectar la influencia de la cobertura vegetal para la generación de caudales en la cuenca alta del río Guadalquivir.
- Realizar la calibración del modelo SWAT, para poder validar la información recolectada de la cuenca alta del río Guadalquivir.
- Demostrar a través del modelo SWAT la variación de caudales a través del tiempo por efectos de cambio de la cobertura vegetal de la cuenca alta del río Guadalquivir.
- Analizar la variación de caudales y su comportamiento, de acuerdo con la modelación y resultados obtenidos con el fin de verificar la correlación entre el cambio de las coberteras y la generación de caudales en la cuenca alta del río Guadalquivir.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Escorrentía

Esta corresponde a la porción de lluvia que no es infiltrada, interceptada o evaporada y que fluye sobre las laderas. También se presenta como el exceso de agua superficial, así como parte del agua subterránea es descargado por los ríos a los océanos, y en menor proporción existe una descarga subterránea directa a los océanos. (Ojeda y Cerquera, 2021, p. 19).

2.2 Balance hídrico

El balance hídrico de una cuenca hidrográfica es fundamental para el conocimiento del afluente y su capacidad de abastecimiento a las poblaciones aledañas que se verán beneficiadas con el recurso, desde el punto de vista teórico el análisis de este permitirá realizar juicios para el uso del afluente como el principal y conseguir un uso más racional de los recursos de agua en el espacio y en el tiempo con la construcción de obras de captación para posterior distribución.

El balance hídrico brindará información acerca de la capacidad del río y los meses del año en el cual el afluente aumenta su caudal o por el contrario lo disminuye como también pondrá permitir realizar predicciones hidrológicas, basado en datos que son registrados por las estaciones meteorológicas cercanas al área de estudio.

El balance hídrico es una herramienta que permite conocer características de la cuenca hidrográfica mediante la aplicación del principio de conservación de la masa o la ecuación de continuidad. El cual se presenta la ecuación de continuidad como: “El volumen de agua que entra en un volumen de control menos el volumen de agua que sale del mismo es igual al volumen que se almacena, durante un periodo de tiempo”.(Ojeda y Cerquera, 2021, p. 21).

$$V_e - V_s = V_a$$

En la cual por medio de la resta de (V_e) que representa el volumen de entrada y (V_s) como volumen de salida, permite la obtención de (V_a) como el volumen almacenado.

2.3 Coberturas Vegetales

El estudio y determinación de los efectos del cambio de cobertura en los caudales generados por una cuenca, proporcionan las herramientas suficientes para analizar con una precisión aproximada los efectos de la reducción de la vegetación nativa en la generación de caudales de una cuenca específica. Así, establecer en qué momento dicho cambio puede ser crítico en la generación de caudales, teniendo implicaciones altamente dañinas para las poblaciones establecidas en las cuencas o aguas abajo de las mismas.

Cobertura vegetal se le llama a la capa de vegetación natural que cubre la superficie terrestre, se incluyen las coberturas vegetales naturales (bosques naturales) y las inducidas que son resultado de la acción antrópica (cultivos). Las coberturas de la tierra proporcionan información fundamental para diversos procesos nacionales como los mapas de ecosistemas, conflictos de uso del territorio, ordenación de cuencas y del territorio, seguimiento a la deforestación de los bosques y los inventarios forestales, solo por citar algunos. (Calderón y Carvajal, 2019, p. 17).

La cobertura vegetal (los atributos biofísicos de la superficie terrestre) y los usos del suelo (los distintos propósitos humanos con los que se aprovechan estos atributos) determinan el funcionamiento de los ecosistemas terrestres: afectan directamente a su biodiversidad, contribuyen a los cambios climáticos locales, regionales y globales y son las fuentes primarias de la degradación del suelo. (Velázquez et al., s. f.).

La cobertura vegetal puede ser definida como la capa de vegetación natural que cubre la superficie terrestre, comprendiendo una amplia gama de biomas con diferentes características fisonómicas y ambientales que van desde pastizales hasta las áreas cubiertas por bosques naturales. (Franceschi Ascanio, 2019, p. 32).

2.4 Relaciones Agua-Vegetación

- *La Vegetación y la Precipitación*

La influencia de la vegetación sobre el régimen de precipitación del área donde se asienta no está bien definida, sin embargo, las últimas tendencias de investigación indican que la distribución de la precipitación depende ante todo de patrones globales de

circulación climática, por lo tanto, el efecto de la vegetación sobre el régimen local de lluvias es mínimo, excepto en cuencas de gran tamaño como la amazónica, donde alrededor del 48% de la precipitación que recibe proviene de la evapotranspiración de la misma cuenca. (Villegas, 2004, p. 75).

- ***Relación Vegetación-Caudal***

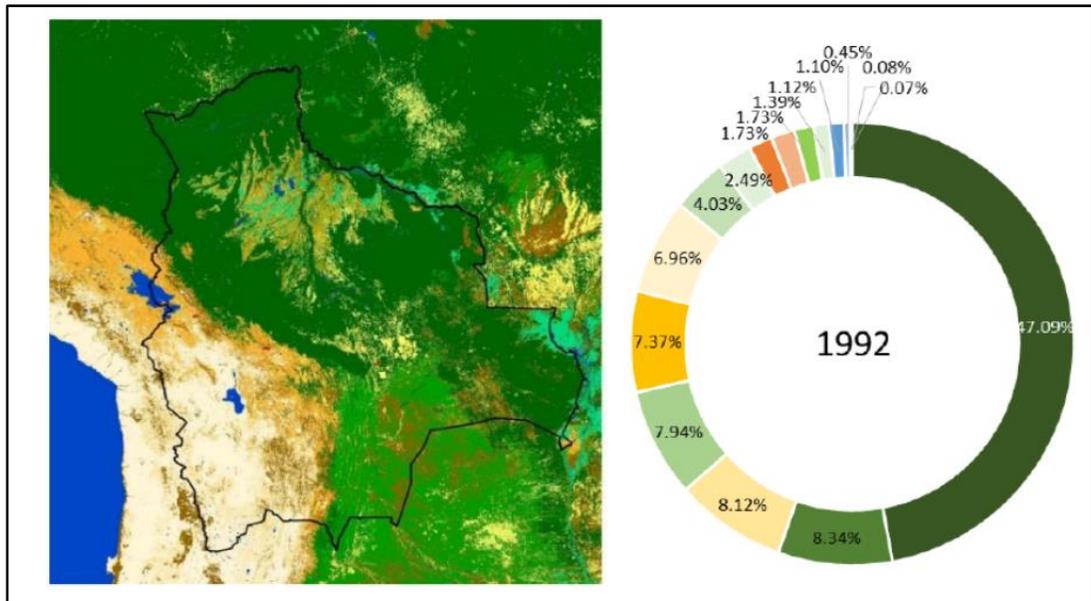
Se ha demostrado el papel de las coberturas boscosas como reguladoras de caudal, porque favorecen la infiltración, gracias a la producción de una capa de hojarasca sobre el suelo mineral y a la disposición de su sistema radicular. Estas propiedades regulan el nivel freático, permiten la recarga de acuíferos alimentadores del flujo base de las corrientes, disminuyen también la cantidad de pérdidas por escorrentía directa de la superficie y retrasan la evacuación instantánea de las lluvias. (Villegas, 2004, p. 75).

2.5 Análisis Multi-Temporal de Cobertura Vegetal

Con una cobertura del 50% de bosque (Figura 2) Bolivia y sus áreas aledañas están dominadas por bosques, en particular las extensiones bastas del bosque húmedo de la cuenca del Amazonas. El resto del territorio está cubierto por arbustos y áreas descubiertas en el Altiplano. Desde la primera clasificación de uso de suelo realizada por el CCI en 1992 para el territorio nacional, se ha presentado una transformación dramática principalmente en las áreas de bosque hacia agricultura hasta el año 2015.

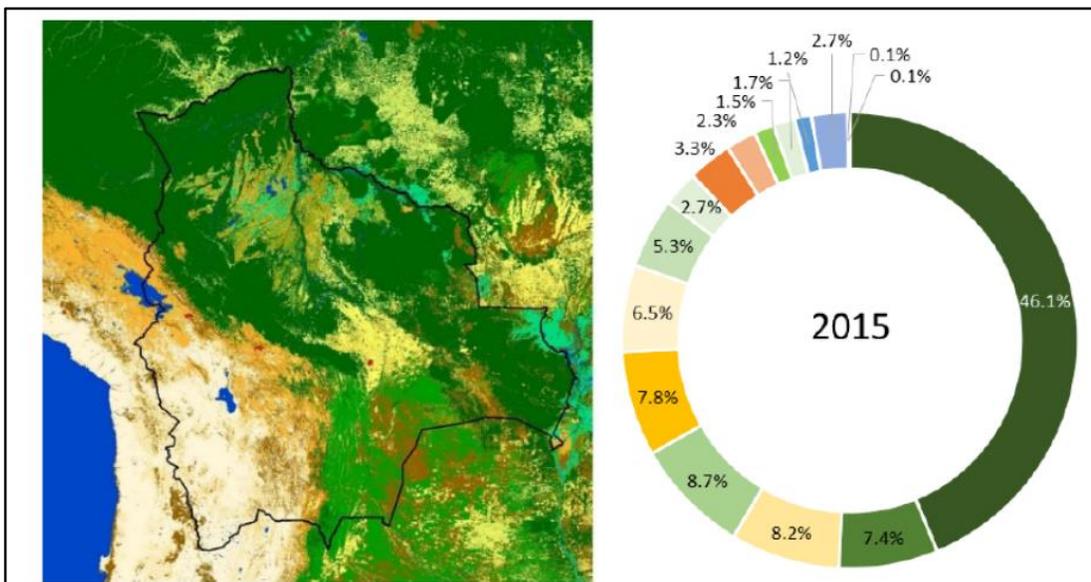
Entre 1992 y 2015 aproximadamente el 9.5% de la superficie de Bolivia cambió de cobertura vegetal, de la cual aproximadamente 4% fue conversión de bosque exclusivamente (MMAyA y UCEP MI RIEGO, 2017, p.157).

Figura 1: Porcentajes regional de las clases CCI de cobertura vegetal para 1992



Fuente: Balance Hídrico Superficial de Bolivia MMAyA y UCEP MI RIEGO

Figura 2: Porcentajes regional de las clases CCI de cobertura vegetal para 2015



Fuente: Balance Hídrico Superficial de Bolivia MMAyA y UCEP MI RIEGO

2.6 Sistemas de información geográfica (SIG)

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) es un tipo especial de base de datos capaz de manejar datos espacialmente referenciados, los cuales pueden representarse gráficamente. Entre las posibilidades de un SIG destaca su capacidad de trabajar con una base de datos no gráfica o descriptiva de objetos del mundo real, los cuales tienen información georreferenciada o de tipo espacial. La mayor utilidad de un sistema de información geográfico está íntimamente relacionada con la capacidad que posee éste de construir modelos o representaciones del mundo real a partir de las bases de datos digitales. (Ojeda y Cerquera, 2021, p. 21).

2.7 Modelos Hidrológicos

Se define un modelo de un sistema como la conceptualización de las interrelaciones y respuestas de un sistema real, a la que se incorpora la esencia del mismo, y que es capaz de predecir las interacciones principales y sus respuestas a un conjunto de condiciones propuesto, es decir es la representación artificial del sistema. (Cahuana y Yugar, 2009, p. 8).

“Son representaciones simplificadas de sistemas reales complejos llamados prototipos bajo forma física o matemática que están representados por una expresión analítica”.

La salida de los modelos hidrológicos varía dependiendo de las metas y objetivos del modelo. Algunos modelos se utilizan para predecir los totales mensuales de escorrentía, mientras que otros están diseñados para ver las tormentas individuales (Calderón y Carvajal, 2019, p. 18).

La utilización de modelos hidrológicos es ampliamente aceptada para la toma de decisiones, pues con su uso normalmente se obtienen resultados aceptables en cuanto a las respuestas hidrológicas de las cuencas estudiadas. Considerando que existen diversos modelos hidrológicos que contemplan diferentes parámetros y que los mismos se utilizan dependiendo de los resultados que se buscan obtener. (Calderón y Carvajal, 2019, p. 19).

2.7.1 Modelos Físicos

Son aquellos modelos en que se usa una representación material del sistema, este tipo de modelos comprende:

2.7.1.1 a) Modelos a Escala

“Son aquellos que representan el sistema en una escala reducida, tal como los modelos de una estructura de control de una obra hidráulica”

2.7.1.2 b) Modelos Análogos

Que usan otro sistema físico que posea propiedades similares a las del prototipo.

2.7.2 c) Modelos Abstractos

Este tipo de modelos son los más extendidos en hidrología, representan el sistema en forma matemática, por lo general se los conoce como modelos matemáticos. Están constituidos por un conjunto de ecuaciones que describen y representan el sistema real, describiendo las variables de entrada y salida. Estas variables pueden ser funciones del espacio y del tiempo y también pueden ser variables probabilísticas o aleatorias. (Cahuana y Yugar, 2009, p. 8).

2.8 Modelo Soil Water Assessment Tool (SWAT)

SWAT es un modelo a escala de cuenca, desarrollado por el Dr. Jeff Arnold del Servicio de Investigación Agrícola de los Estados Unidos (ARS). SWAT fue desarrollado para predecir el impacto de las prácticas de manejo del suelo sobre el agua, los sedimentos y los rendimientos químicos para la agricultura en grandes cuencas complejas con diferentes tipos y usos del suelo y condiciones de manejo durante largos períodos de tiempo. Para satisfacer este objetivo, el modelo es de base física: en lugar de incorporar ecuaciones de regresión para describir la relación entre las variables de entrada y salida, SWAT requiere información específica sobre el clima, las propiedades del suelo, la topografía, la vegetación y las prácticas de manejo de la tierra que se aplican en la cuenca. (Weber y Ocampo, 2019, p. 35).

El modelo hidrológico SWAT “Soil and Water Assessment Tool” es un modelo determinístico semi-distribuido con un grado cognoscitivo conceptual o también conocido como caja gris - físicamente basado, desarrollado para predecir los impactos en las prácticas del manejo de los suelos y vegetación en la producción de agua, sedimentos y químicos agrícolas en grandes y complejas cuencas con diferentes suelos, uso del suelo y condiciones de manejo durante largos periodo. (Guerra, 2015, p. 18).

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

Donde:

SW_t=Contenido final de agua en el suelo (mm H₂O).

SW₀= Contenido de agua en el suelo en el día i (mm H₂O).

t= Tiempo en el día.

R_{day}= Precipitación en el día i (mm H₂O)

Q_{surf}= Escorrentía en el día i (mm H₂O)

E_a= Evapotranspiración en el día i (mm H₂O).

W_{seep}= Agua que entra en la zona no saturada del suelo en el día i (mm H₂O)

Q_{gw}= Caudal en el día I (mm H₂O)

2.9 Unidades hidrológicas de respuesta

Las unidades de respuesta hidrológica (UHR's) son áreas de cuenca que son homogéneas en términos de su respuesta hidrológica al clima. Las UHR's están conformadas usualmente por áreas dispersas, desconectadas entre sí, pero que mantienen propiedades comunes de especial importancia hidrológica, como son: Pendiente (Que determina la velocidad de la escorrentía superficial), tipo de suelo y cobertura vegetal.

El modelo SWAT trabaja por unidades de respuesta hidrológica (HRU's) como resultado del cruce de los diferentes tipos de suelo, con el uso y cobertura del suelo.(Ojeda y Cerquera , 2021, p. 25).

2.10 Coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe

Es uno de los criterios estadísticos más importantes y utilizados para evaluar la calidad del ajuste entre el hidrograma simulado por los modelos hidrológicos y lo observado, permite la comparación entre las cuencas hidrográficas, y se indica la relación 1:1 entre la línea de ajuste de los datos observados y simulados. (Ojeda y Cerquera, 2021, p. 25).

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}$$

En el cual Q_{sim} corresponde al caudal simulado por el modelo, Q_i se refiere al caudal medido y por último \bar{Q} el valor correspondiente a la media de los caudales observados.

2.11 Calibración y Validación del Modelo SWAT

La calibración de este modelo se basa en obtener datos reales obtenidos en campo, éstos puedan ser comparados con los calculados en SWAT.

Es importante destacar que en la calibración del modelo SWAT se necesitará datos de entrada (parámetros climáticos como precipitación y temperatura) y datos de salida que se presentan como registros mensuales de caudal para la microcuenca. Estos valores son comparados con los datos observados en las estaciones de aforo y mediante ajustes sucesivos de un conjunto de parámetros que definen las características físicas y la dinámica de la cuenca se procede a la calibración. (Terán, 2016, p. 11)

La calibración del modelo SWAT ayuda a minimizar los errores en la modelación. Una perspectiva sobre la calibración es que la calidad de los datos depende de la información acerca de los fundamentos de los parámetros, la presencia de errores de medición y registro de los mismos hace que la calidad se deteriore, reduciendo la confianza en las estimaciones de los parámetros. Los errores se dan debido a muchas razones entre las cuales están los errores de registro, mal funcionamiento de las máquinas, aproximaciones en curvas de calibración, cambios en el nivel del río, entonces para mejorar estos errores es necesario realizar una validación.

La validación del modelo consiste en medir su capacidad predictiva mediante la comparación de los escurrimientos calculados y los observados con los parámetros determinados en la fase de calibración, pero en un período diferente. El ajuste entre escurrimientos observados y calculados obtenido en la calibración, pero es más representativo de la exactitud de las predicciones que se hagan con el modelo. (Terán, 2016, p. 12).

2.12 SWAT-CUP (SWAT Calibration and Uncertainty Programs)

Un programa informático para la calibración de modelos SWAT. SWAT-CUP es un programa de dominio público y como tal, puede usarse y copiarse libremente. El programa vincula los procedimientos SUFI2, PSO, GLUE, Para Sol y MCMC con SWAT. Permite el análisis de sensibilidad, la calibración, la validación y el análisis de incertidumbre de los modelos SWAT. SWAT-CUP 2012 ha sido probado para todos los procedimientos antes del lanzamiento. (Abbaspour, s. f., p. 24).

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA Y DESARROLLO

La presente investigación busca llegar al conocimiento “desde afuera”, en el caso de la investigación de la influencia multitemporal del cambio de la cobertura vegetal en la generación de caudales en la cuenca alta del río Guadalquivir, se utiliza la recopilación de la información mediante el uso de estrategias estadísticas basadas en la medición numérica, esto permite predecir patrones de comportamiento de las variables y probar los diferentes fundamentos teóricos expuestos en la bibliografía actual.

Dentro de este enfoque se utilizó el diseño de la investigación no experimental del tipo descriptivo, cuyo objetivo central fue caracterizar, exponer, describir, presentar e identificar aspectos particulares de la problemática del cambio de cobertura en la generación de caudales.

A pesar, de que el cambio de la cobertura vegetal en la generación de caudales es de mucho interés en la parte social y medioambiental como también en la toma de decisiones para la gestión de recursos hídricos en Bolivia y particular para el departamento de Tarija, es por esto que se planteó el presente trabajo y desarrollar esta investigación, ya que busca resolver un problema en un contexto determinado, es decir busca la aplicación o utilización de conocimientos, con el propósito de implementarlos de forma práctica para satisfacer una necesidad concreta, proporcionando una o advertencia a problemas del sector social o productivo.

El diseño de la investigación es determinante respecto a las relaciones entre el alcance del estudio que se plantea y los métodos y técnicas que se utilizarán para la recolección y análisis de datos.

3.1 Fase I

Recopilación y generación de información básica y temática del área de estudio, en esta fase partiendo de un criterio hidrológico el cual afirma que la delimitación de cuencas se basa en la altitud del terreno se llevó a cabo la descarga del modelo digital de elevación (DEM) por medio del programa de Satélite de Alaska (ASF) y sensor Alos Palsar con una

resolución espacial final de 12.5 m, seguidamente se realizó la descripción de la topografía de zona de estudio con la ayuda de la generaron curvas de nivel a partir del mencionado DEM.

Después se realizó la adaptación de la capa geográfica y la información de las coberturas vegetales suministrada por página oficial de Geo Bolivia para los años (2001, 2010) y para el periodo de 2021 se obtuvo de la página oficial del Proyecto ESA WorldCover [2021] / Contiene datos modificados de Copernicus Sentinel ([2021]) procesados por el consorcio ESA WorldCover con el año 2020 o 2021 para el mapa WorldCover 2020 y 2021 y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), siguiendo la metodología Corine Land Cover (CLC) expuesta para Bolivia y relacionándola con su respectiva cobertura SWAT.

Posteriormente, se realizaron los ajustes pertinentes requeridos por el modelo hidrológico SWAT de la capa geográfica del tipo de suelos, la cual fue suministrada por la página oficial de Geo Bolivia conforme a las exigencias claras respecto a la forma en la que se debe ingresar la información de suelo al modelo hidrológico SWAT.

Por otra parte, se realizó la descarga de los datos hidrológicos históricos de mínimo 20 años atrás de temperaturas máximas y mínimas, precipitación y humedad relativa del instituto de servicio nacional de meteorología e hidrología, se ingresó esta información a la base de datos del modelo y en formatos legibles para el modelo hidrológico SWAT reconozca la información suministrada. Por último, como resultado final de esta fase se logra tener la información cartográfica y alfanumérica.

3.2 Fase II

Implementación y calibración del modelo hidrológico SWAT. Para la presente fase se tuvo en cuenta lo expuesto por SWAT, en cuanto se explica que para obtener resultados el modelo SWAT se requiere diversos parámetros de entrada, los cuales están relacionados con las características físicas de la cuenca, además de esto el modelo utiliza una combinación de métodos para realizar los diferentes cálculos para estimar el comportamiento del agua en la cuenca, su almacenamiento y transporte.

Por lo tanto, y según lo explicado anteriormente, se procedió a correr el modelo con todos los datos de topografía, cobertura vegetal y uso de suelo, tipos de suelos y clima introducidos en el modelo hidrológico SWAT; dado que esta información es indispensable para que el proceso se realice de forma satisfactoria.

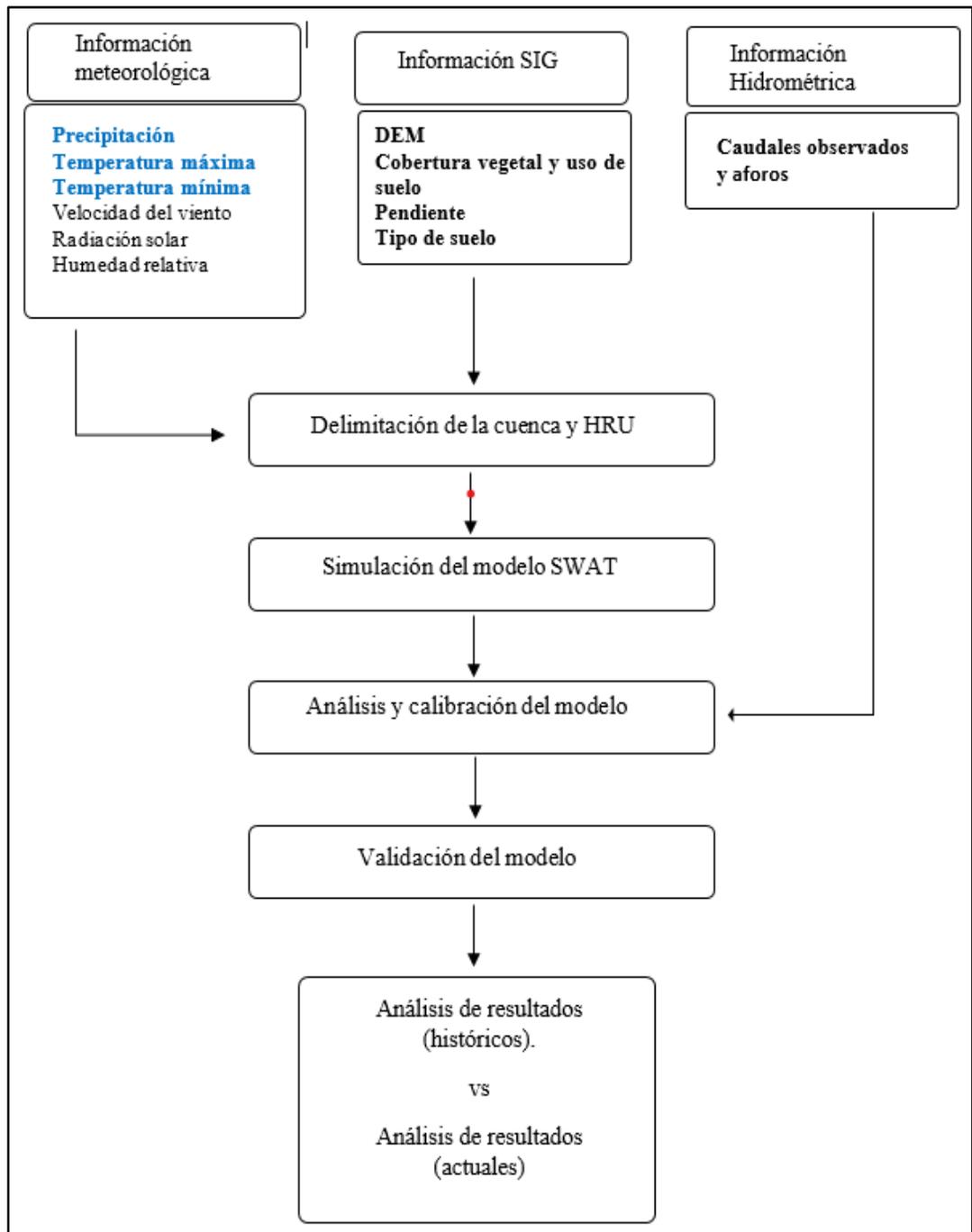
En seguida se realizó la calibración del modelo a través de “Prueba error”, aplicando la ecuación de coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe.

Finalmente se hace el análisis multitemporal de los datos obtenidos por medio de la calibración y se elabora el documento final del desarrollo de un proyecto de investigación.

Es de gran importancia resaltar que, en el apartado de anexos, se explica el paso a paso del procedimiento realizado por medio de la utilización del software ArcGIS y la interfase ArcSWAT, para la realización del presente estudio correspondiente al análisis multitemporal de la influencia de la cobertura vegetal en la generación de caudales con el modelo SWAT aplicado en la cuenca alta del río Guadalquivir.

A continuación, se detalla los pasos en un mapa conceptual los pasos del modelo SWAT para su modelación de manera satisfactoria, que se siguieron para realizar el análisis multitemporal de la cobertura vegetal en la generación de caudales y el ingreso de la información de acuerdo con las claves de control de la interface del modelo Arc SWAT.

Figura 3: Estructura de la metodología para la modelación hidrológica con SWAT



Fuente: Elaboración propia

3.3 Recolección de información

Para la recopilación de información se buscó de diferentes fuentes con el fin de tener los datos necesarios para el procesamiento y análisis de datos mediante el modelo Arc Swat.

Los datos climatológicos se obtendrán del instituto meteorológico SENAMHI, estos datos son fundamentales para la alimentación del modelo cuyos datos principales son precipitaciones diarias, temperaturas máximas, temperaturas mínimas y caudales estos datos son importantes para la calibración y validación, como datos complementarios son velocidad de viento, radiación solar, humedad relativa, estos últimos datos pueden ser obtenidos por el instituto SENAMHI, o también información que es obtenida de su base de datos del modelo Arc Swat, este último mencionado es para completar la data faltantes.

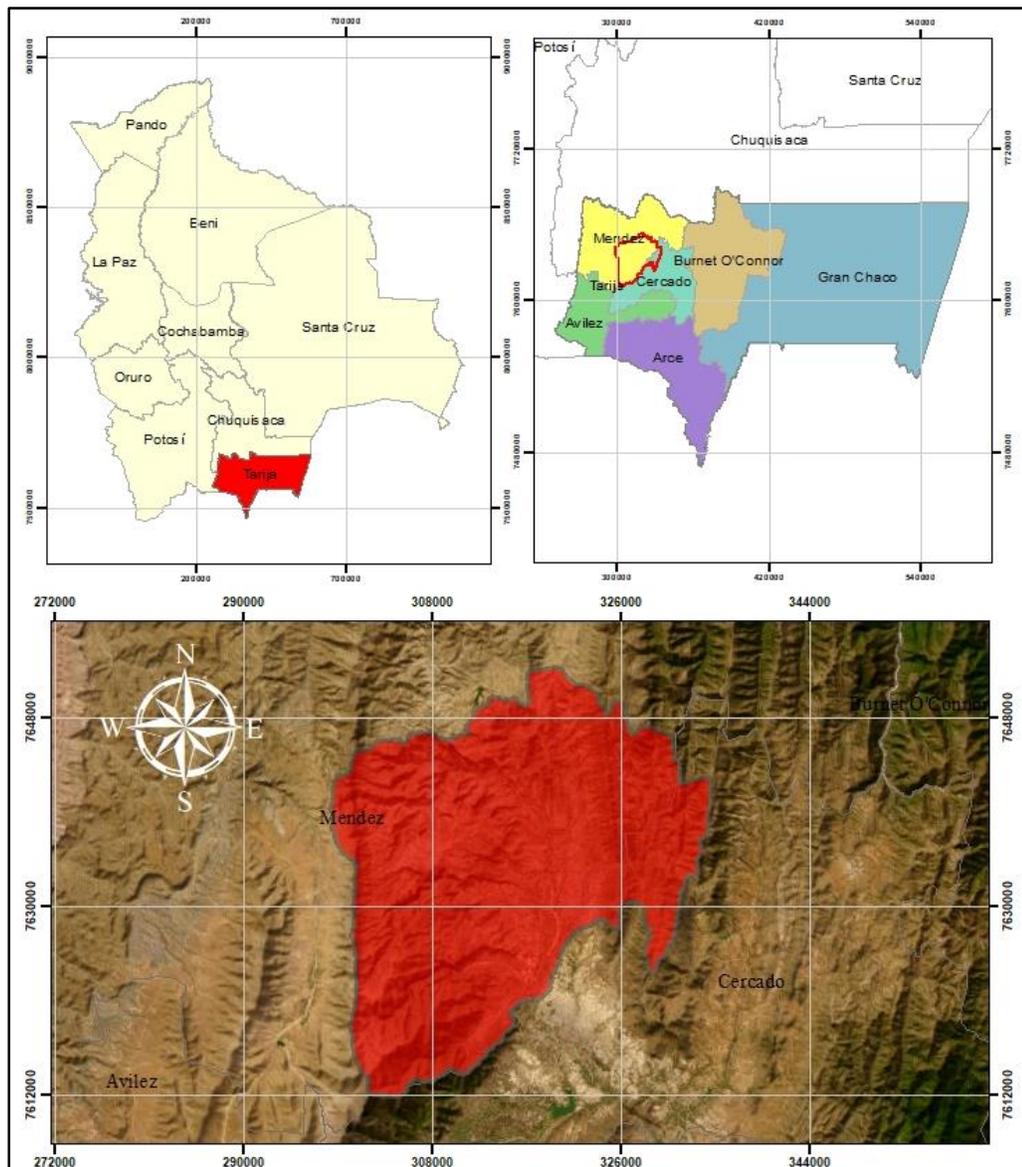
Los datos de cobertura vegetal y uso de suelo como también el mapa de suelos serán obtenidos de la página oficial de la FAO o también de la página de Geo Bolivia.

Los mapas de Modelo Digital de Elevación (DEM) serán obtenidas de la página oficial de Geo Bolivia.

3.4 Ubicación Geográfica

La zona de la cuenca Alta del río Guadalquivir se ubica al sud del municipio de San Lorenzo, geográficamente entre los 21°12'56'' a 21°35'16'' de latitud Sud y 64°35'40'' a 64°56'50'' de longitud Oeste (Datum WGS 84), también comprende parte del municipio de Tarija en la orientación Sur-Este y el municipio de El puente al Oeste. Cuenta con un área aproximada de 924,04 km² la cual tiene su cierre final en el punto de aforo de la estación de Obrajes.

Figura 4: Mapa de ubicación geográfica de la cuenca alta del Río Guadalquivir

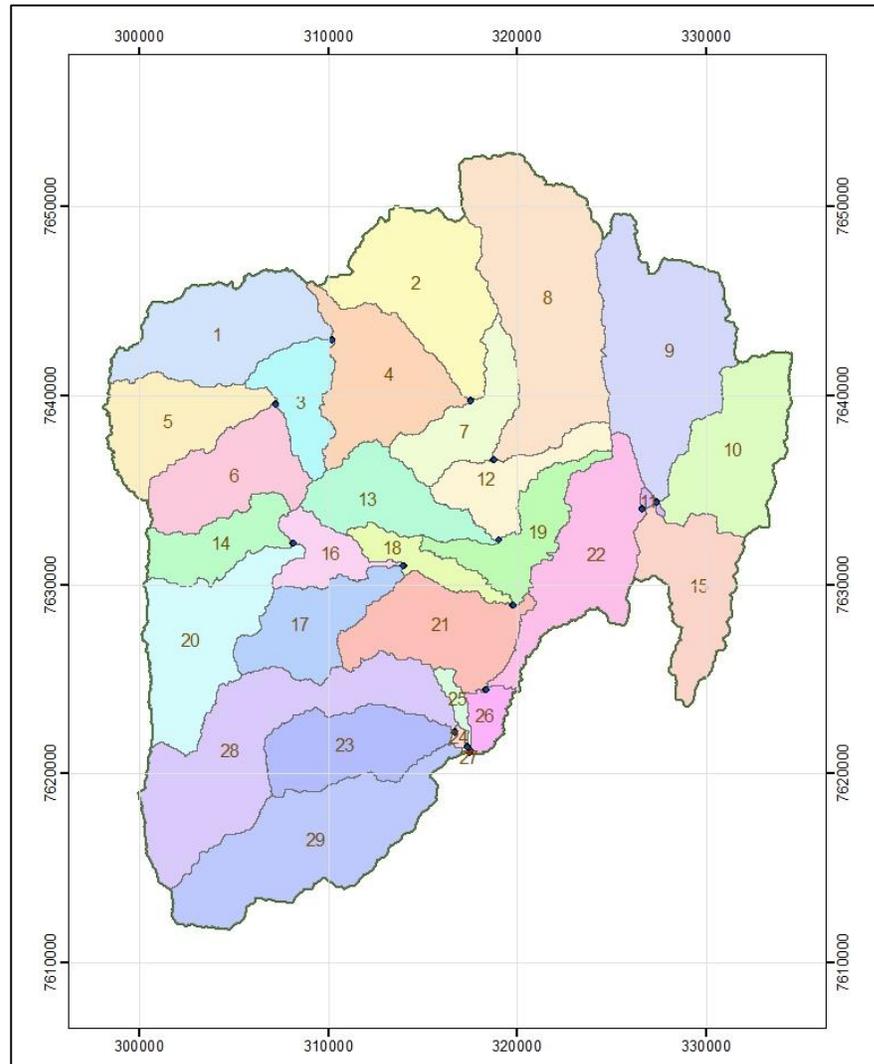


Fuente: Elaboración propia, con apoyo del ArcGIS en base a información SIG.

3.5 Delimitación de la cuenca hidrográfica

La delimitación de la cuenca como datos se necesita la topografía del terreno, para el presente trabajo se utilizó un DEM de resolución 12.5, esta información se puede adquirir de diferentes fuentes de descarga libre, programa de Satélite de Alaska (ASF) y sensor Alos Palsar, se tomará en cuenta un punto de cierre para dicha delimitación con ayuda del programa ArcGIS que está próximo al puente San Martín.

Figura 5: Mapa de sub cuencas de la cuenca Alta del río Guadalquivir



Fuente: Elaboración propia,

3.6 Morfométricas de la Cuenca Hidrográfica a través de SWAT

La morfométricas y los índices asociados permiten la relación de la forma del terreno y el comportamiento hidrológico de la cuenca en estudio.

3.6.1 Área de la Cuenca y sub cuencas (A).

El área de la cuenca determinada a través de la delimitación con el programa Arc GIS tiene un área de 909.094 km².

Tabla 1: Área de Sub Cuencas de la Cuenca Alta del Río Guadalquivir

| Sub Cuenca | Área (km2) | Área(%) | Sub Cuenca | Área (km2) | Área(%) |
|------------|------------|---------|------------|------------|---------|
| 1 | 44.430 | 4.89 | 16 | 13.549 | 1.49 |
| 2 | 49.196 | 5.41 | 17 | 27.699 | 3.05 |
| 3 | 18.744 | 2.06 | 18 | 11.599 | 1.28 |
| 4 | 41.282 | 4.54 | 19 | 22.628 | 2.49 |
| 5 | 32.174 | 3.54 | 20 | 44.883 | 4.94 |
| 6 | 32.678 | 3.59 | 21 | 36.879 | 4.06 |
| 7 | 22.973 | 2.53 | 22 | 42.667 | 4.69 |
| 8 | 81.872 | 9.01 | 23 | 32.227 | 3.54 |
| 9 | 67.056 | 7.38 | 24 | 0.820 | 0.09 |
| 10 | 41.843 | 4.60 | 25 | 3.000 | 0.33 |
| 11 | 0.832 | 0.09 | 26 | 6.117 | 0.67 |
| 12 | 20.910 | 2.30 | 27 | 0.029 | 0.00 |
| 13 | 27.990 | 3.08 | 28 | 70.873 | 7.80 |
| 14 | 20.242 | 2.23 | 29 | 61.657 | 6.78 |
| 15 | 32.245 | 3.55 | | | |

Fuente: Elaboración propia, en base a los resultados de Arc Swat

3.6.2 Perímetro de la cuenca y sub cuencas (P).

El dato determinado del perímetro de la cuenca en estudio tiene un 168.528 km.

Tabla 2: Perímetro de Sub Cuencas de la cuenca alta del Río Guadalquivir

| Sub Cuenca | Perímetro (Km) | sub cuenca | Perímetro (Km) |
|------------|----------------|------------|----------------|
| 1 | 44.15 | 16 | 30.22 |
| 2 | 47.04 | 17 | 37.18 |
| 3 | 29.80 | 18 | 32.86 |
| 4 | 46.19 | 19 | 47.94 |
| 5 | 38.33 | 20 | 49.44 |
| 6 | 37.06 | 21 | 43.19 |
| 7 | 37.18 | 22 | 56.05 |
| 8 | 61.57 | 23 | 35.62 |
| 9 | 55.45 | 24 | 4.99 |
| 10 | 41.51 | 25 | 15.38 |
| 11 | 6.55 | 26 | 16.16 |
| 12 | 37.66 | 27 | 1.02 |
| 13 | 37.24 | 28 | 75.03 |
| 14 | 33.10 | 29 | 59.05 |
| 15 | 42.29 | | |

Fuente: Elaboración propia, en base a los resultados de Arc Swat

3.6.3 Topografía de la cuenca

Tabla 3: Factores Topográficos de la Cuenca alta del Río Guadalquivir

| | | |
|------------|-----------|-----------|
| Min. | elevación | 1914 m |
| Max. | elevación | 4335 m |
| media | elevación | 2603.06 m |
| desviación | estándar | 457.6022 |

Fuente: Elaboración propia, en base a los resultados de Arc Swat

3.7 Selección de estaciones meteorológicas

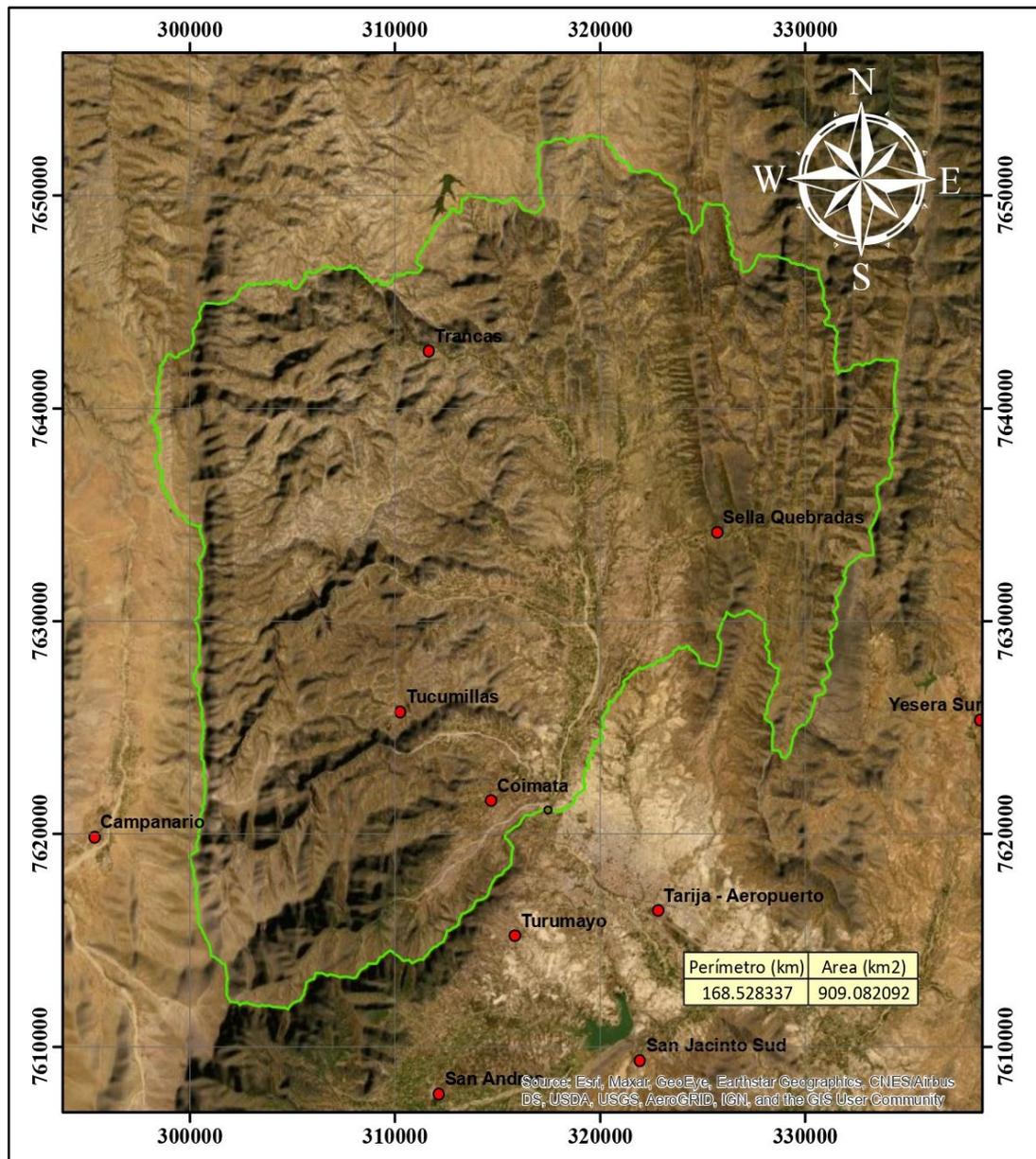
Para la modelación en el programa ARC SWAT es indispensable contar con los datos de precipitaciones diarias, temperaturas máximas y temperaturas mínimas, como datos complementarios esta la humedad relativa, radiación solar, velocidad de viento, el dato de los caudales son datos que deben ser datos obtenidos de aforos reales, dichos datos son esenciales para la calibración y validación del modelo, pero antes se selecciona las estaciones que estén dentro de la cuenca de estudio como así también estaciones cerca de la zona de estudio para tener una modelación más acorde, considerando la disponibilidad de datos de los periodos requeridos para el análisis.

Tabla 4: Estaciones meteorológicas utilizadas para el modelo SWAT

| Numero | Nombre | Latitud | Longitud | Elevación (m) |
|--------|-------------------|---------|----------|---------------|
| 1 | Coimata | -21.499 | -64.789 | 2027 |
| 2 | Trancas | -21.307 | -64.816 | 2198 |
| 3 | Sella Quebradas | -21.386 | -64.681 | 2145 |
| 4 | Aeropuerto Tarija | -21.547 | -64.711 | 1849 |
| 5 | Campanario | -21.513 | -64.976 | 3460 |
| 6 | San Andrés | -21.623 | -64.815 | 1987 |
| 7 | San Jacinto Sud | -21.61 | -64.72 | 1820 |
| 8 | Tucumillas | -21.461 | -64.831 | 2557 |
| 9 | Turumayo | -21.557 | -64.778 | 1978 |
| 10 | Yesera Norte | -21.372 | -64.551 | 2267 |
| 11 | Yesera Sud | -21.145 | -64.558 | 2092 |

Fuente: Elaboración propia, en base a los datos obtenidos de SENAMHI

Figura 6: Mapa de estaciones Meteorológicas



Fuente: Elaboración propia, con apoyo del ArcGIS en base a información SIG.

3.8 Análisis Climatológico para la Cuenca

Se presentará el análisis climatológico de la cuenca Alta del río Guadalquivir, se realizará a partir de datos históricos de las estaciones mencionadas anteriormente, es

necesario se podrá considerar estaciones adicionales con el fin de contar más datos en la zona de estudio.

3.8.1 Temperatura

Los datos de temperaturas máximas como así las mínimas son fundamentales para la modelación con el programa SWAT estos datos fueron obtenidos de la página oficial del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), en la siguiente tabla de se detalla las estaciones que cuentan con data de temperaturas.

Tabla 5: Estaciones meteorológicas con data de temperatura Máx. y Mín.

| Numero | Nombre | Latitud | Longitud | Elevación (m) |
|--------|-------------------|---------|----------|---------------|
| 1 | Coimata | -21.499 | -64.789 | 2027 |
| 2 | Trancas | -21.307 | -64.816 | 2198 |
| 3 | Sella Quebradas | -21.386 | -64.681 | 2145 |
| 4 | Aeropuerto Tarija | -21.547 | -64.711 | 1849 |
| 5 | Campanario | -21.513 | -64.976 | 3460 |
| 6 | San Andrés | -21.623 | -64.815 | 1987 |
| 7 | San Jacinto Sud | -21.61 | -64.72 | 1820 |
| 8 | Tucumillas | -21.461 | -64.831 | 2557 |
| 9 | Turumayo | -21.557 | -64.778 | 1978 |
| 10 | Yesera Norte | -21.372 | -64.551 | 2267 |
| 11 | Yesera Sud | -21.145 | -64.558 | 2092 |

Fuente: Elaboración propia, en base a los datos obtenidos de SENAMHI

3.8.2 Precipitación

Los datos de precipitación medias diarias son datos importantes de entrada para el modelo Arc Swat, datos que fueron obtenidas de la página oficial del instituto SENMHI, en la siguiente tabla se especifica las estaciones que se utilizaron para la modelación de la cuenca de estudio.

Tabla 6: Estaciones meteorológicas con data de precipitaciones Diarias

| Numero | Nombre | Latitud | Longitud | Elevación (m) |
|--------|-------------------|---------|----------|---------------|
| 1 | Coimata | -21.499 | -64.789 | 2027 |
| 2 | Trancas | -21.307 | -64.816 | 2198 |
| 3 | Sella Quebradas | -21.386 | -64.681 | 2145 |
| 4 | Aeropuerto Tarija | -21.547 | -64.711 | 1849 |
| 5 | Campanario | -21.513 | -64.976 | 3460 |
| 6 | San Andrés | -21.623 | -64.815 | 1987 |
| 7 | San Jacinto Sud | -21.61 | -64.72 | 1820 |
| 8 | Tucumillas | -21.461 | -64.831 | 2557 |
| 9 | Turumayo | -21.557 | -64.778 | 1978 |
| 10 | Yesera Norte | -21.372 | -64.551 | 2267 |
| 11 | Yesera Sud | -21.145 | -64.558 | 2092 |

Fuente: Elaboración propia, en base a los datos obtenidos de SENAMHI

3.9 Determinación de Pendientes en la Cuenca

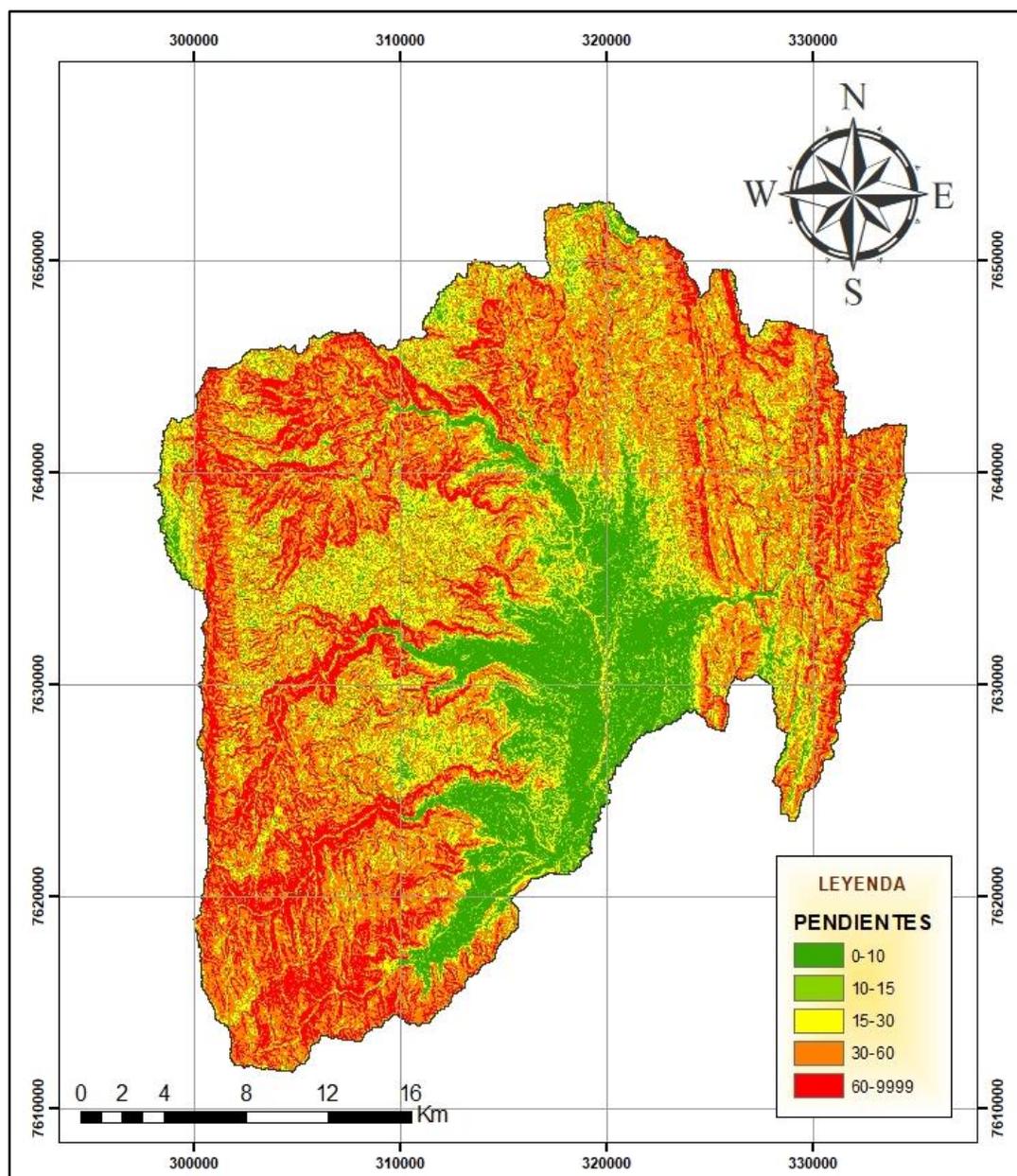
La clasificación de pendiente de la cuenca alta del río Guadalquivir se presenta una distribución espacial de las pendientes, con valores presentados en la tabla 7, en la cual se puede observar que tiene una mayor predominancia las pendientes tipo IV catalogado como pendientes escarpados.

Tabla 7: Rango de pendiente de la cuenca alta del Río Guadalquivir

| GRADO | PENDIENTE % | PORCENTAJE | TIPO DE PENDIENTE |
|-------|---------------|------------|-------------------|
| I | $0 \leq 10$ | 15% | Leve |
| II | $>10 \leq 15$ | 8% | Ondulado |
| II | $>15 \leq 30$ | 22% | inclinado |
| IV | $>30 \leq 60$ | 37% | Escarpado |
| V | >60 | 19% | Muy escarpado |

Fuente: Elaboración propia, en base a los resultados de Arc Swat.

Figura 7: Mapa de Pendientes



Fuente: Elaboración propia, con apoyo del ArcGIS en base a información SIG.

3.10 Análisis de Cobertura Vegetal

Para hacer el análisis de la cobertura se toma en cuenta información de la cobertura y uso de suelo de toda la cuenca de estudio en este estudio se encontró información de tres periodos temporales para poder elaborar dicho análisis, que dicha información está en la

página oficial de Geo Bolivia para los años (2001, 2010) y para el periodo de 2021 se obtuvo de la página oficial del Proyecto ESA WorldCover [2021] / Contiene datos modificados de Copernicus Sentinel ([2021]) procesados por el consorcio ESA WorldCover con el año 2020 o 2021 para el mapa WorldCover 2020 y 2021, en este estudio se tomó en cuenta el tipo de cobertura del 2021.

3.11 Coberturas vegetal y uso de la tierra 2001

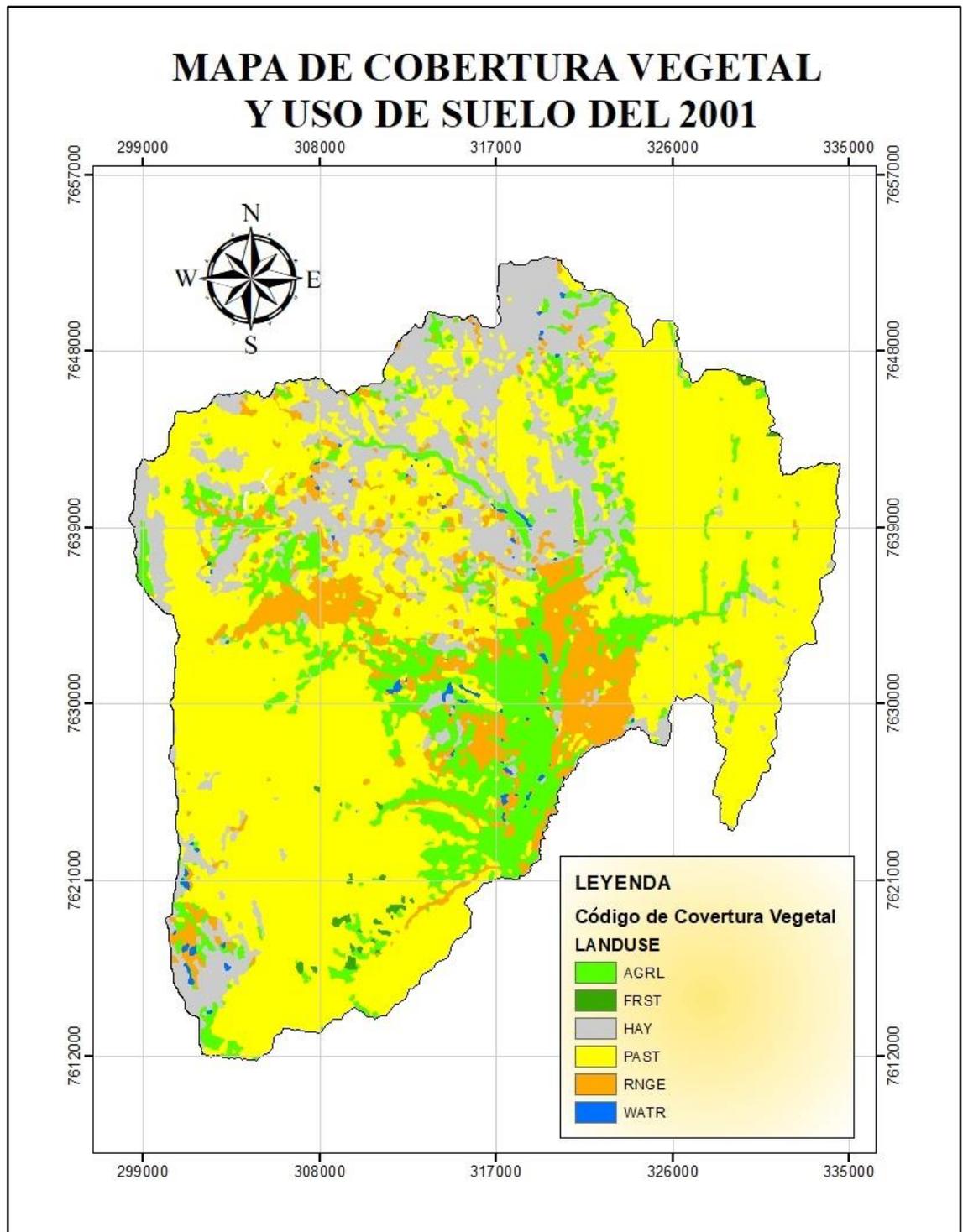
De acuerdo con el mapa de cobertura vegetal y uso de suelo de 2001, de la cuenca alta del río Guadalquivir consta con 6 tipos de cobertura de la Tierra el mapa de cobertura vegetal de la página oficial de Geo Bolivia tiene una escala 1:250.000

Tabla 8: Cobertura vegetal y uso de suelo periodo 2001

| N | Código Landuse | Cobertura y uso de Suelo 2001 | | |
|---|----------------|-------------------------------|---------|----------------------------|
| | | Área (km ²) | Área(%) | Cobertura |
| 1 | AGRL | 124.64 | 13.78 | Tierra de cultivo |
| 2 | FRST | 2.72 | 0.30 | Cubierta de arboles |
| 3 | HAY | 154.32 | 17.06 | Vegetación desnuda/escasa |
| 4 | PAST | 540.15 | 59.72 | Pradera |
| 5 | RNGE | 78.79 | 8.71 | Matorral |
| 6 | WATR | 3.85 | 0.43 | Cuerpos de agua permanente |

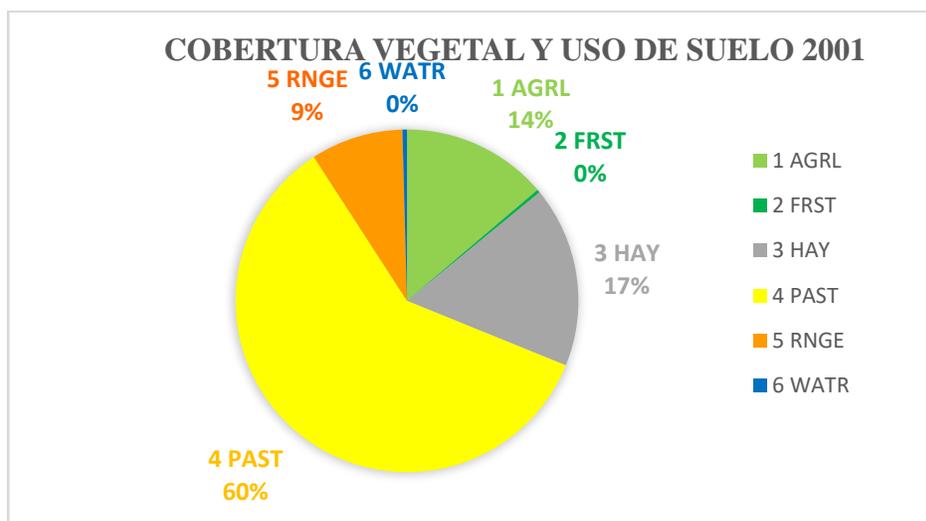
Fuente: Elaboración propia, en Base a la clasificación según la FA

Figura 8: Mapa de cobertura vegetal y uso de suelo del año 2001



Fuente: Elaboración propia, con apoyo del ArcGIS en base a información SIG.

Gráfico 1: Porcentaje de cobertura vegetal y uso de suelo 2001



Fuente: Elaboración propia, en Base a la clasificación según la FAO

3.12 Coberturas vegetal y uso de la tierra 2010

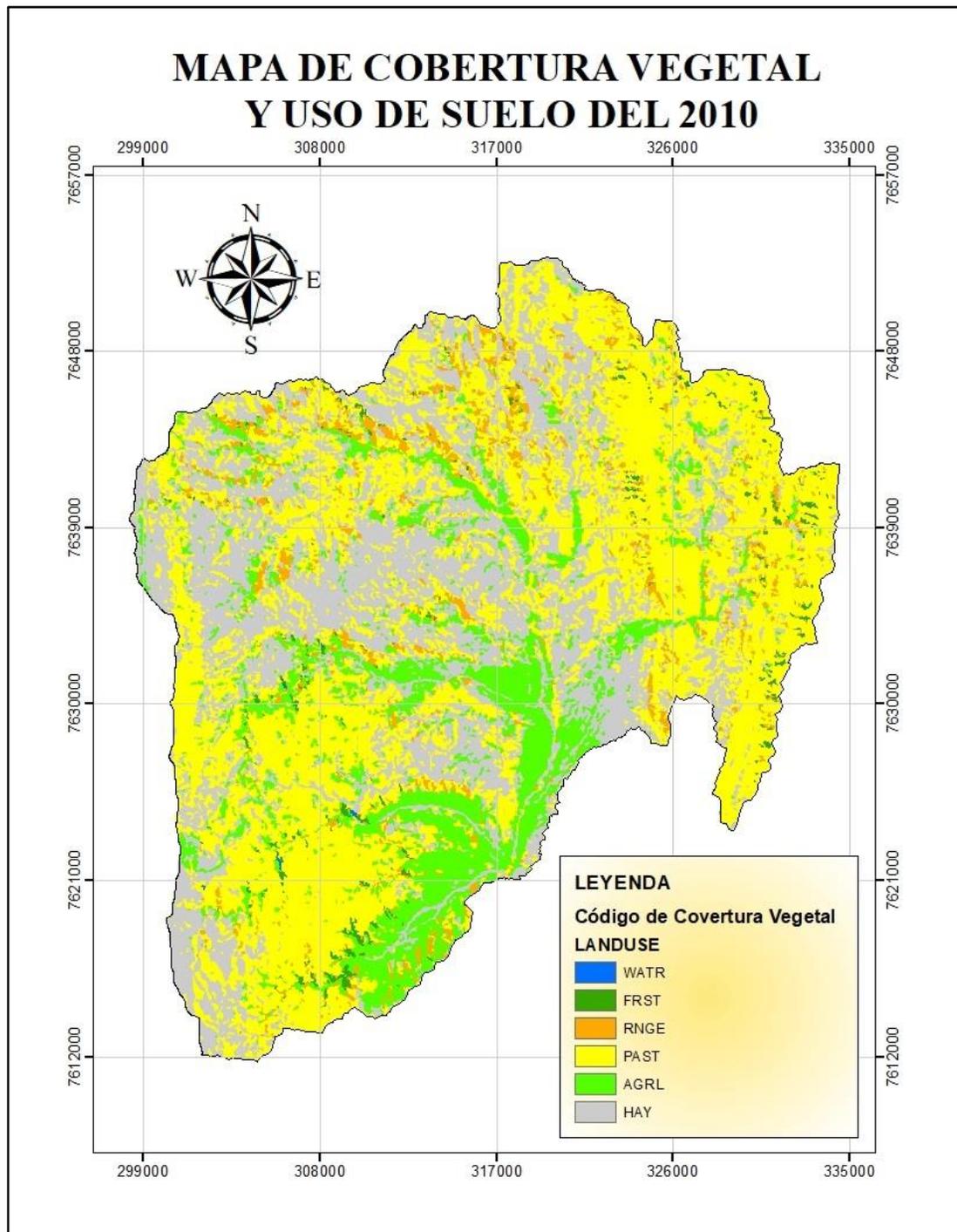
De acuerdo con el mapa de cobertura vegetal y uso de suelo de 2001, de la cuenca alta del río Guadalquivir consta con 6 tipos de cobertura de la Tierra el mapa de cobertura vegetal de la página oficial de Geo Bolivia tiene una escala 1:250.000

Tabla 9: Cobertura vegetal y uso de suelo periodo 2010

| N | Código Landuse | Cobertura y uso de Suelo 2010 | | |
|---|----------------|-------------------------------|---------|----------------------------|
| | | Área (km ²) | Área(%) | Cobertura |
| 1 | AGRL | 125.52 | 13.873 | Tierra de cultivo |
| 2 | FRST | 9.75 | 1.077 | Cubierta de arboles |
| 3 | HAY | 296.85 | 32.810 | Vegetación desnuda/escasa |
| 4 | PAST | 430.94 | 47.631 | pradera |
| 5 | RNGE | 41.33 | 4.568 | Matorral |
| 6 | WATR | 0.37 | 0.041 | Cuerpos de agua permanente |

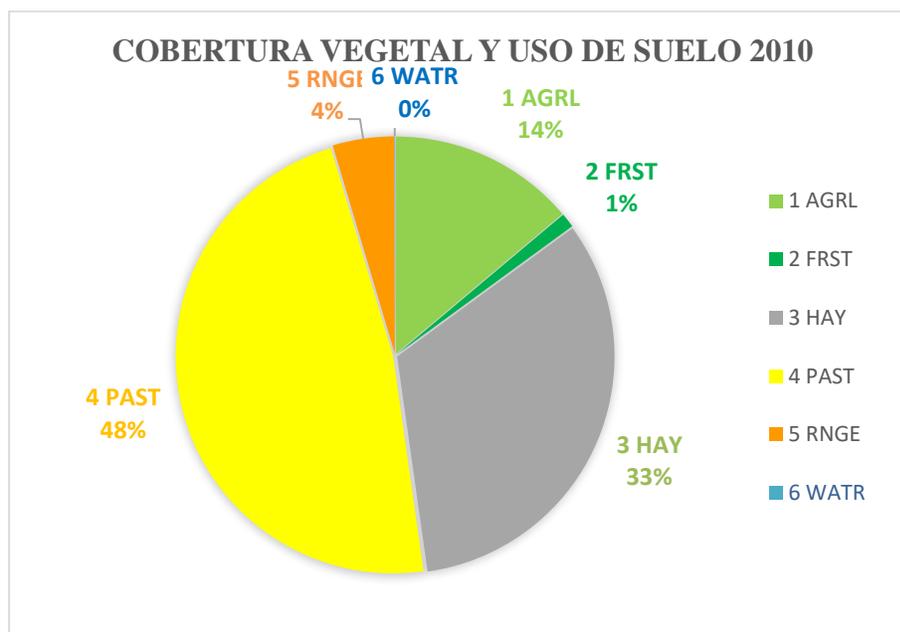
Fuente: Elaboración propia, con base a la clasificación según la FAO

Figura 9: Mapa de cobertura vegetal y uso de suelo del año 2010



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 2: Porcentaje de cobertura vegetal y uso de suelo 2010



Fuente: Elaboración propia, con base a la clasificación según la FAO

3.13 Coberturas vegetal y uso de la tierra 2021.

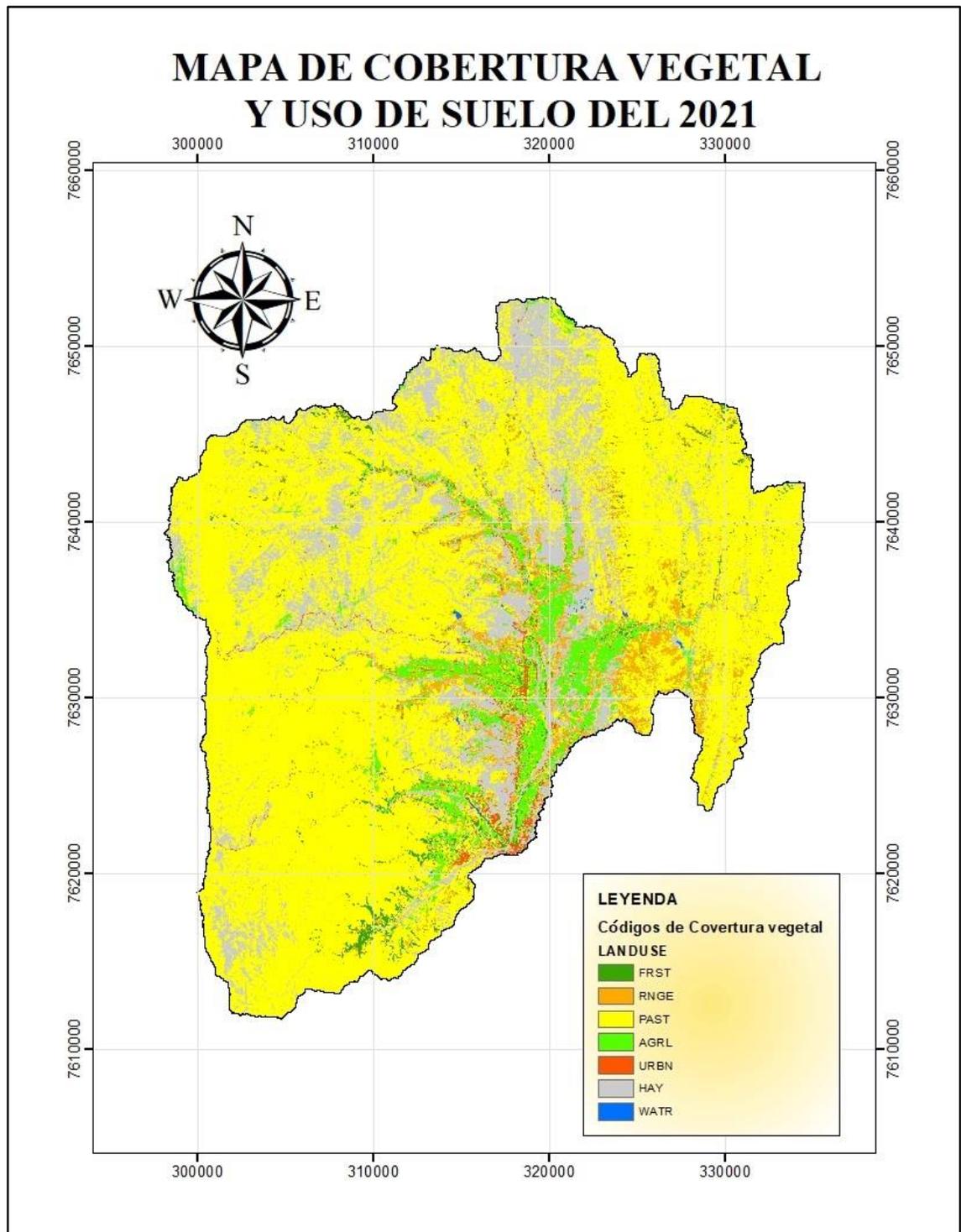
De acuerdo con el mapa de cobertura vegetal y uso de suelo de 2001, de la cuenca alta del río Guadalquivir consta con 6 tipos de cobertura de la Tierra el mapa de cobertura vegetal de la página oficial de Geo Bolivia tiene una escala 1:250.000

Tabla 10: Cobertura vegetal y uso de suelo periodo 2021

| N | Código Landuse | Cobertura y uso de Suelo 2021 | | |
|---|----------------|-------------------------------|---------|----------------------------|
| | | Área (km ²) | Área(%) | Cobertura |
| 1 | AGRL | 48.64 | 5.38 | Tierra de cultivo |
| 2 | FRST | 12.93 | 1.43 | Cubierta de arboles |
| 3 | HAY | 176.62 | 19.52 | Vegetación desnuda/escasa |
| 4 | PAST | 612.12 | 67.66 | Pradera |
| 5 | RNGE | 45.99 | 5.08 | Matorral |
| 6 | URBN | 7.74 | 0.86 | Urbano |
| 7 | WATR | 0.73 | 0.08 | Cuerpos de agua permanente |

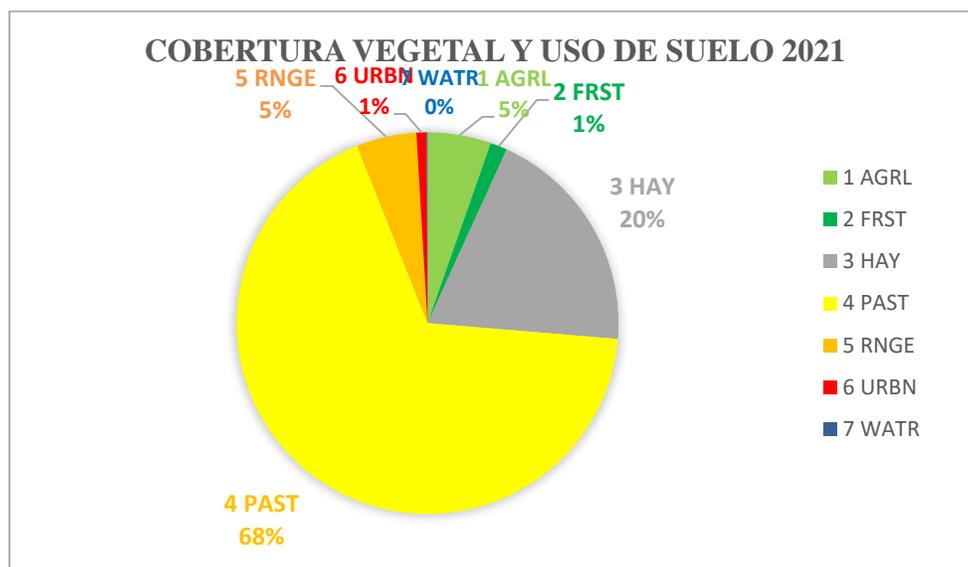
Fuente: Elaboración propia, en Base a la clasificación según la FAO

Figura 10: Mapa de cobertura vegetal y uso de suelo del año 2021



Fuente: Elaboración propia, con apoyo del ArcGIS en base a información SIG.

Gráfico 3: Porcentaje de cobertura vegetal y uso de suelo 2021



Fuente: Elaboración propia, con base a la clasificación según la FAO

3.14 Análisis de variación de la cobertura vegetal en los periodos de estudio

A continuación, se realizará un análisis más específico del cambio de cobertura vegetal y uso de suelo de la sub cuenca La Victoria en la siguiente tabla se mostrará un resumen de las áreas de mayor cambio y sus diferentes combinaciones de los tipos de cobertura vegetal según la abreviatura de la clasificación de la FAO en toda la cuenca alta del río Guadalquivir.

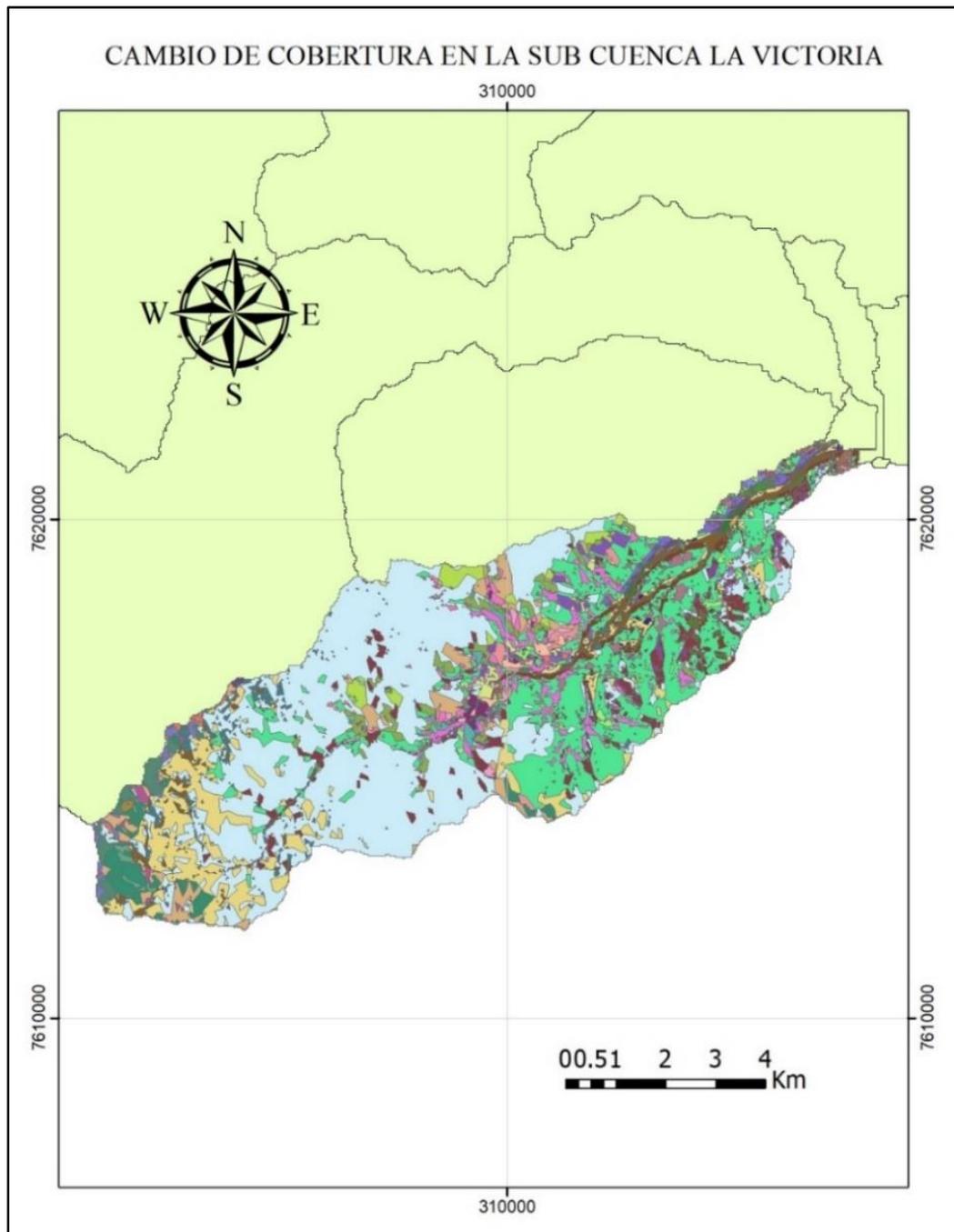
En toda la sub cuenca en estudio se pudo determinar 86 combinaciones de cambio de cobertura vegetal y uso de suelo, tomando en cuenta este análisis los tres periodos de estudio.

Tabla 11: Área del cambio de cobertura en la sub cuenca de La Victoria

| Nº | Antes y Luego de la cobertura 2001 – 2010 - 2021 | Área (ha) |
|----|---|-----------|
| 1 | PAST - AGRL - PAST | 1274.10 |
| 2 | HAY - HAY - PAST | 617.51 |
| 3 | PAST - HAY - PAST | 604.81 |
| 4 | PAST - RNGE - PAST | 231.37 |

Fuente: Elaboración propia

Figura 11: Mapa de cambio de cobertura de la sub cuenca La Victoria



Fuente: Elaboración propia

3.15 Caracterización del Suelo

Para el análisis de la caracterización del estudio de suelo se toma en cuenta mapas de tipo de suelo que fueron obtenidos de la página oficial Geo Bolivia, dichos datos están

trabajados según la clasificación de la FAO, dicha información que cumple el formato de estudio de la data de entrada para el modelamiento con Arc Swat, esta información es de descarga libre de factores confiables al ser una página oficial de extracción de datos para múltiples estudios a nivel Nacional.

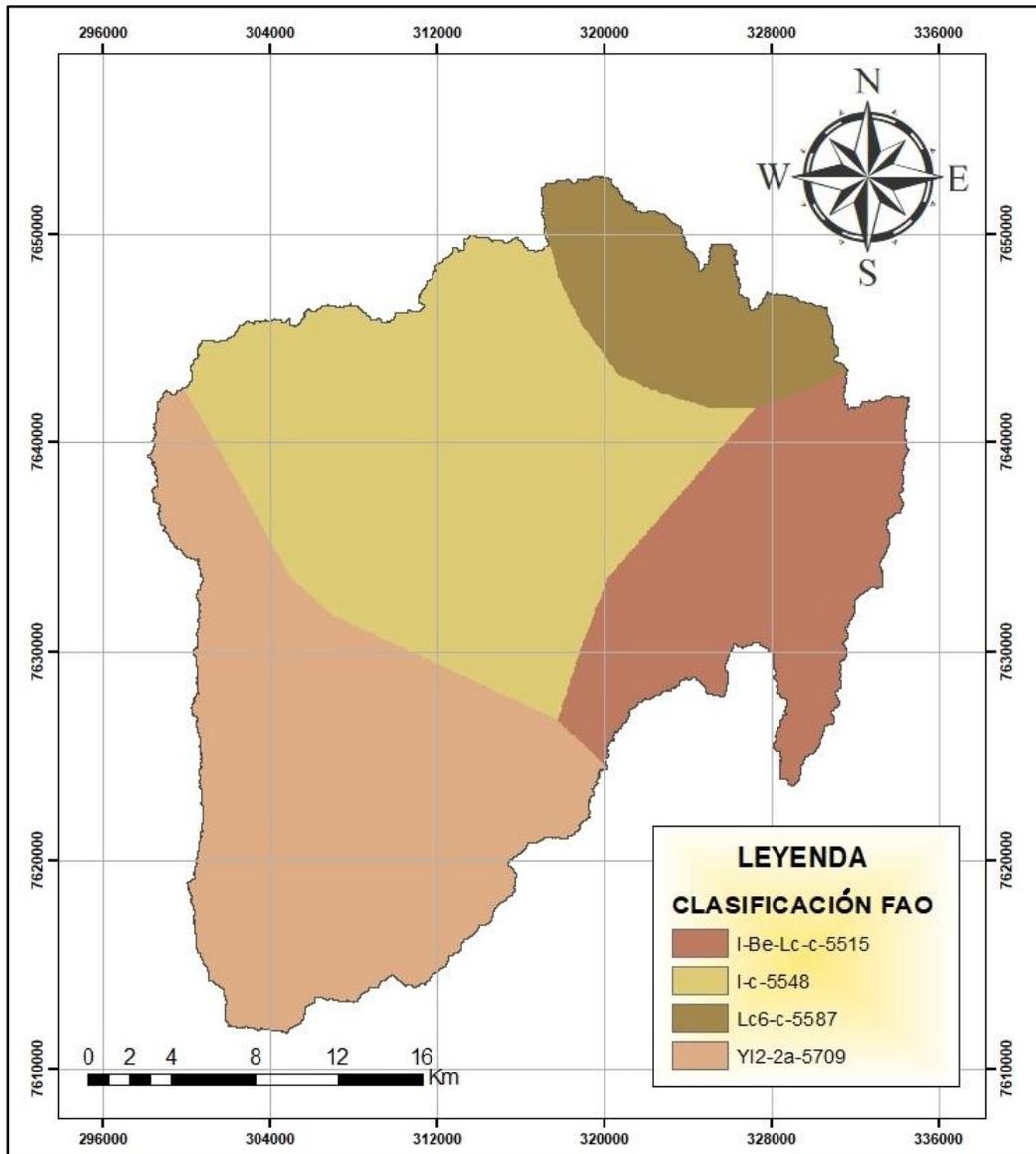
En esta circunstancia se tomó en cuenta cuatro tipos de suelos en la cuenca alta del río Guadalquivir, en la siguiente tabla se especificará más a detalle el significado de los tipos de suelo tomando en cuenta la simbología, vegetación y como último la litología que indica el tipo de suelo y sus asociaciones de las mismas.

Tabla 12: Tipo de suelo según la clasificación de la FAO

| N° | Símbolo del Mapa | Suelos Asociados | Inclusión | Presencia | Vegetación | Litología |
|----|------------------|------------------|-----------|-----------|---|--|
| 1 | I-Be-Lc-c | | | Bolivia | Bosques higrofitico montano y de alta montaña y bosque hidrofítico nuboso, paramo y tundra alpina. | Rocas clásticas paleozoicas antiguas, pizarras y areniscas devonianas y silúricas y de pósitos glaciales, pre glaciales y glaso fluviales del cuaternario. |
| 2 | I-c | | | Bolivia | Pastizales de alta montaña y bosques de pylepis en el oeste. Bosques montanos en las cadenas sub andinas. | Rocas clásticas ordoviciano silúricas en el oeste, Rocas clásticas carbonífero - pérmicas y terciarias en las cadenas subandinas. |
| 3 | Lc6-c | I Vc | So | Bolivia | Bosque seco montano, monte xerofítico y pastizales. | Rocas clásticas ordoviciano silúricas y devonianas. |
| 4 | Yl 2-2a | Zo | | Bolivia | Desierto montano. | Cenizas cuaternarias. |

Fuente: Elaboración propia. con base a la clasificación de la FAO

Figura 12: Mapa del tipo de suelo según la FAO



Fuente: Elaboración propia, con apoyo del ArcGIS en base a información SIG.

3.16 Modelación Hidrológica (SWAT)

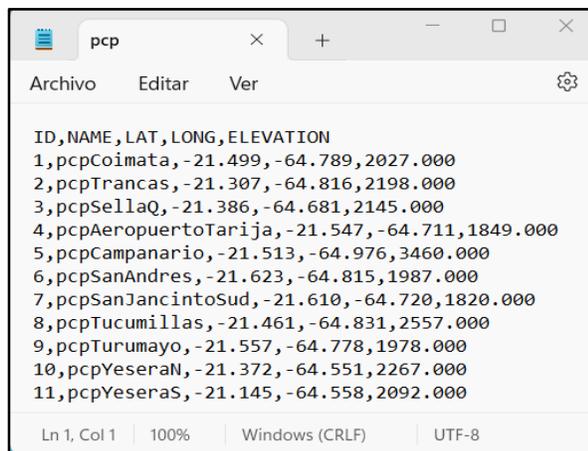
Para esta etapa se realizará el ingreso de los datos al modelo, como datos topográficos, de cobertura vegetal, tipo de suelo y por último los datos climatológicos para que el programa los procese y de esta manera obtener la información como ser la escorrentía superficial.

Procesamiento de datos para Arc Swat. Con la información completada antes se tiene que hacer un tratamiento de toda la información para poder construir bases de para que puedan ser procesadas por Arc Swat. A continuación, se detallará el proceso y el formato que necesita el modelo como así también el presente trabajo.

Clima. Los datos de entra para la herramienta de modelación SWAT requiere un formato específico, considerando que la información de SENMHI es de diferente formato, se realiza un tratamiento de los mismos. Se crearán archivos de texto con la misma estructura mostrada en las siguientes figuras estos formatos son específicamente para los datos de precipitación, temperaturas, velocidad de viento y humedad relativa teniendo en cuenta que la radiación solar se trabajó con la base de datos de la herramienta SWAT.

Para los datos faltantes SWAT tiene una base de datos interna, en caso de datos faltantes se completa en los cuadros vacíos con la siguiente numeración -99.00, estos datos deben tener como máximo 3 años de datas faltantes, si excede esos periodos dicha estación será descartada.

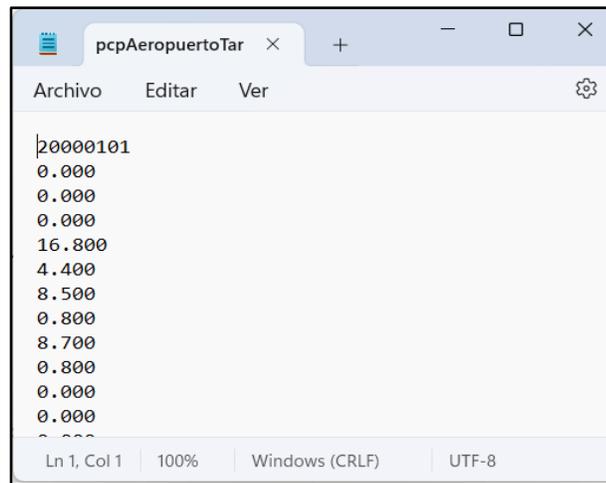
Figura 13: Ejemplo de la forma donde se encuentra la información básica de las estaciones



```
pcp
Archivo  Editar  Ver
ID,NAME,LAT,LONG,ELEVATION
1,pcpCoimata,-21.499,-64.789,2027.000
2,pcpTrancas,-21.307,-64.816,2198.000
3,pcpSellaQ,-21.386,-64.681,2145.000
4,pcpAeropuertoTarija,-21.547,-64.711,1849.000
5,pcpCampanario,-21.513,-64.976,3460.000
6,pcpSanAndres,-21.623,-64.815,1987.000
7,pcpSanJancintoSud,-21.610,-64.720,1820.000
8,pcpTucumillas,-21.461,-64.831,2557.000
9,pcpTurumayo,-21.557,-64.778,1978.000
10,pcpYeseraN,-21.372,-64.551,2267.000
11,pcpYeseraS,-21.145,-64.558,2092.000
Ln 1, Col 1 | 100% | Windows (CRLF) | UTF-8
```

Fuente: Elaboración propia

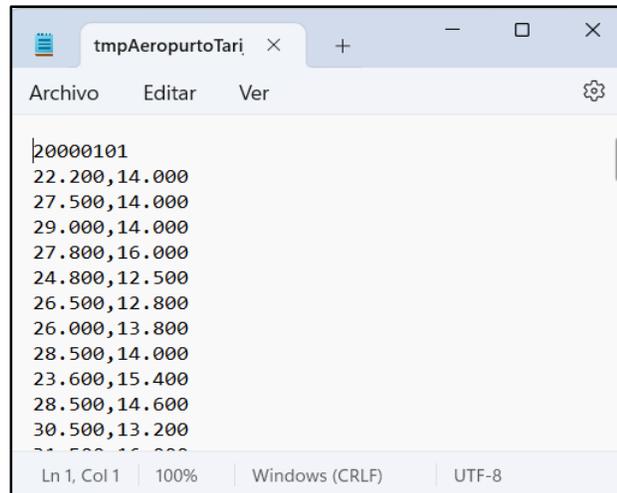
Figura 14: Ejemplo de los formatos para la correcta lectura de las variables climáticas en el Modelo, para Precipitaciones



```
pcpAeropuertoTar
Archivo  Editar  Ver
|20000101
0.000
0.000
0.000
16.800
4.400
8.500
0.800
8.700
0.800
0.000
0.000
0.000
0.000
0.000
Ln 1, Col 1 | 100% | Windows (CRLF) | UTF-8
```

Fuente: Elaboración propia

Figura 15: Ejemplo de los formatos para la correcta lectura de las variables climáticas en el Modelo, para temperaturas máximas y mínimas



```
tmpAeropuertoTari
Archivo  Editar  Ver
|20000101
22.200,14.000
27.500,14.000
29.000,14.000
27.800,16.000
24.800,12.500
26.500,12.800
26.000,13.800
28.500,14.000
23.600,15.400
28.500,14.600
30.500,13.200
30.500,13.200
Ln 1, Col 1 | 100% | Windows (CRLF) | UTF-8
```

Fuente: Elaboración propia

3.17 Calibración Del Modelo (SWAT)

Para la calibración se toma en cuenta en cuenta diversos parámetros, con información medida con la cual se analizará, generados por el modelo y establecer el grado de error por la cual el modelo es generado, en este presente estudio se tomó en cuenta el programa SWAT-CUP (SWAT Calibration and Uncertainty Programs) el programa tiene muchos parámetros de calibración se escogió el programa SUFI2 que es el más utilizado y recomendable para esta región.

En la tabla se detallará los parámetros que se utilizó para la calibración de este estudio tomando en cuenta lo parámetros más sensibles.

Tabla 13: Valores de Calibración según el Programa SWAT-CUP

| Nombre | Min. | Máx. | Especificación |
|----------|------|------|---|
| CN2 | -0.3 | 0.3 | Número de curva de escorrentía para condiciones de humedad |
| ALPHA | 0 | 1 | factor de recesión de flujo base |
| GW_DELAY | 30 | 450 | el tiempo de demora para el recargue del acuífero |
| GWQMN | 0 | 2 | Limite en el nivel de agua al acuífero poco profundo para el flujo base |
| SOL_AWC | -0.2 | 0.4 | cantidad de agua disponible en el suelo |
| ESCO | 0.8 | 1 | factor de compensación de evaporación del suelo |

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV

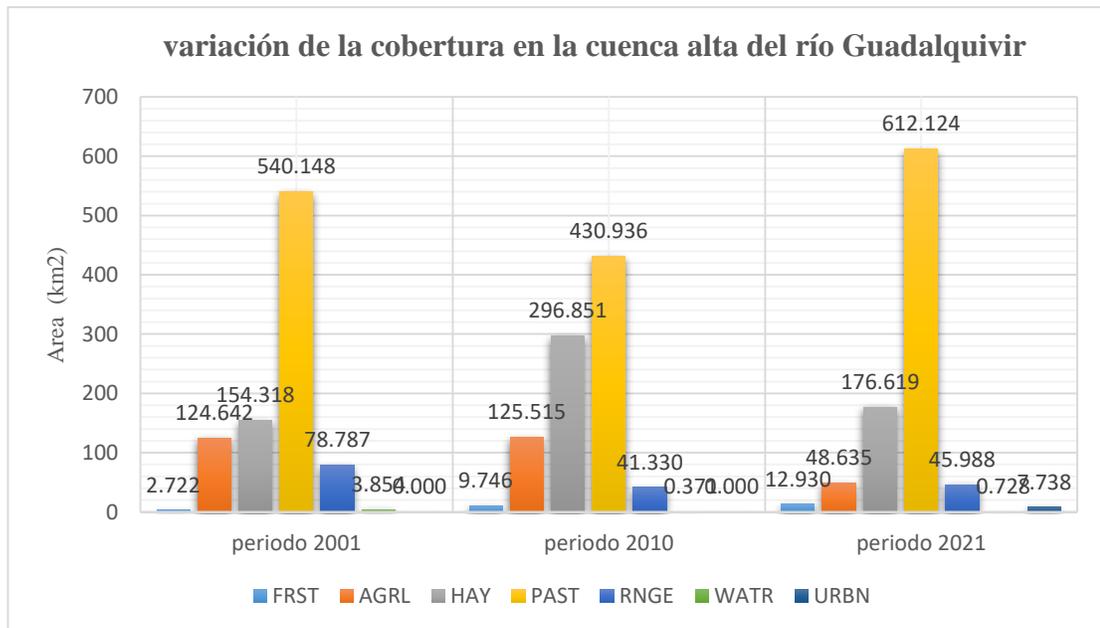
ANÁLISIS Y RESULTADOS

A continuación, se presenta un análisis del cambio de la cobertura a partir de mapas oficiales en base a la clasificación de la FAO con una escala de 1:250.000 de Geo Bolivia previamente procesada y delimitada, así mismo también de los caudales simulados frente a los observados. Todo este análisis será verificará si existe una influencia en los caudales a partir de una variación en las coberturas vegetales y uso de suelo en la Cuenca alta del Río Guadalquivir con el comportamiento hidrológico.

4.1 Relación del cambio de las coberturas vegetales

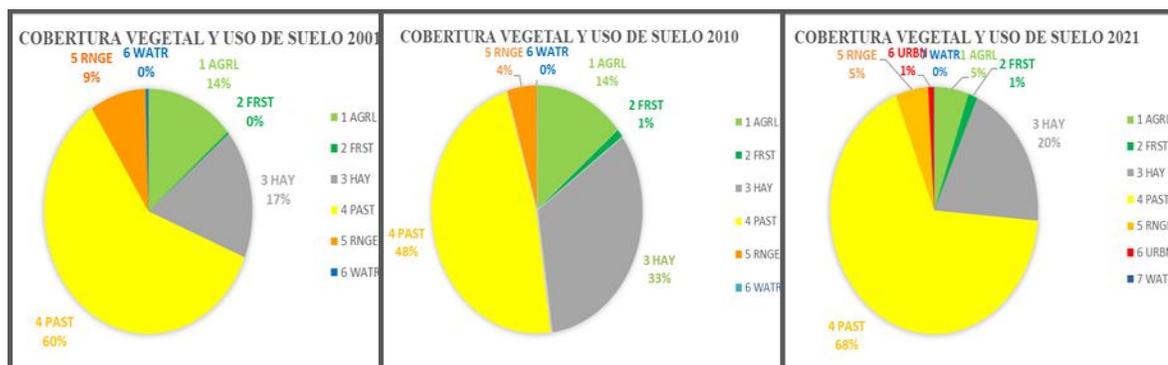
En el gráfico mostrado llamado numeral de cambio de cobertura de la tierra que se presenta en la Cuenca alta del río Guadalquivir durante los diferentes periodos analizados.

Gráfico 4: Variación de la cobertura vegetal en los periodos de estudio



Fuente: Elaboración propia, en base a la clasificación de la FAO.

Figura 16: Comparación de tipos de cobertura en las escalas de tiempo en estudio



Fuente: Elaboración propia

Tabla 14: Significado según la Codificación la FAO en la cobertura vegetal

| Tierra de cultivo | Cubierta de árboles | Vegetación desnuda/escasa | Pradera | Matorral | Cuerpos de agua permanente | Urbano |
|-------------------|---------------------|---------------------------|---------|----------|----------------------------|--------|
| AGRL | FRST | HAY | PAST | RNGE | WATR | URBN |

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con los datos mostrados de cobertura de la tierra en los diferentes periodos se observa y se lo analiza que todas varían ya que se presentan aumentos como así disminución. Sé que con el pasar del tiempo algunos de los tipos de cobertura van apareciendo y desapareciendo de algunas zonas pasando de 6 tipos coberturas a 7 tipos de coberturas.

Se puede observar que el tipo de cobertura de mayor predominancia es el de praderas (PAST) que ocupa casi la mayoría de la cuenca alta del río Guadalquivir, se observa que tiene un buen cambio en los periodos del 2010 baja considerablemente de un 60% a un 48% y en el periodo 2021 hay un aumento importante que llega a un 68%.

En la parte de la cobertura de tierra de cultivos (AGRL) se puede observar una que en los periodos 2001 y 2010 se mantiene en porcentaje de un 14% pero en el periodo 2021

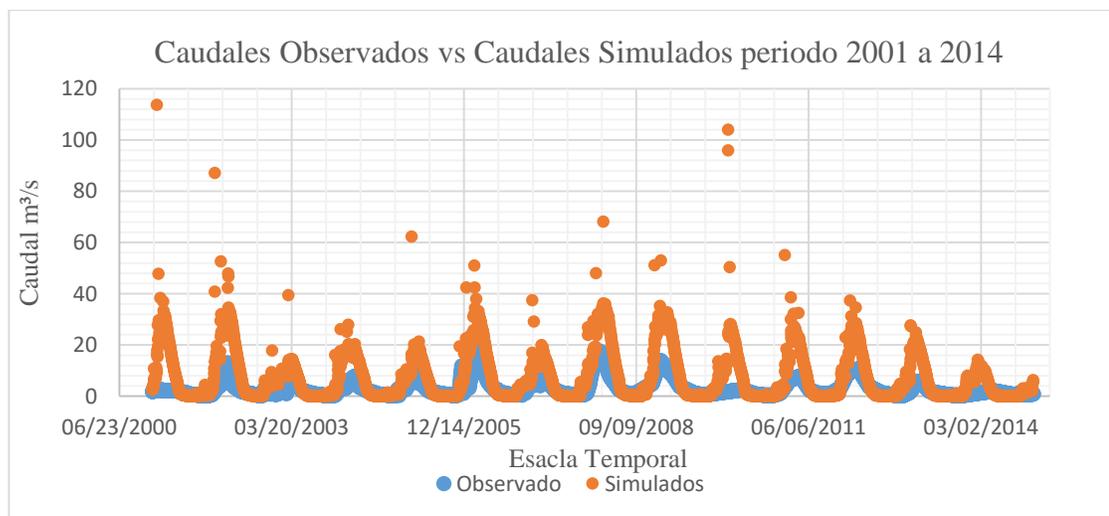
ahí sí que se baja considerablemente a un 5% eso se debe a muchos factores, pero el más principal es al cambio climático.

También se puede observar que la cobertura de vegetación desnuda (HAY), tiene cambios importantes comenzando en el periodo 2001 con 17%, a su vez en el periodo 2010 aumento considerablemente a un 30% pero ya en la actualidad empezó a disminuir en un 20%.

4.2 Resultados de la modelación en los periodos 2001 – 2014

En la figura se presenta la correlación de simulados con los observados para un periodo de 2001 a 2014, en lo cual se puede observar o evidenciar un comportamiento similar, con picos altos que con la calibración y los parámetros adecuados se podrá corregir adecuadamente.

Gráfico 5: Caudales Observados vs Caudales simulados del 2001-2014

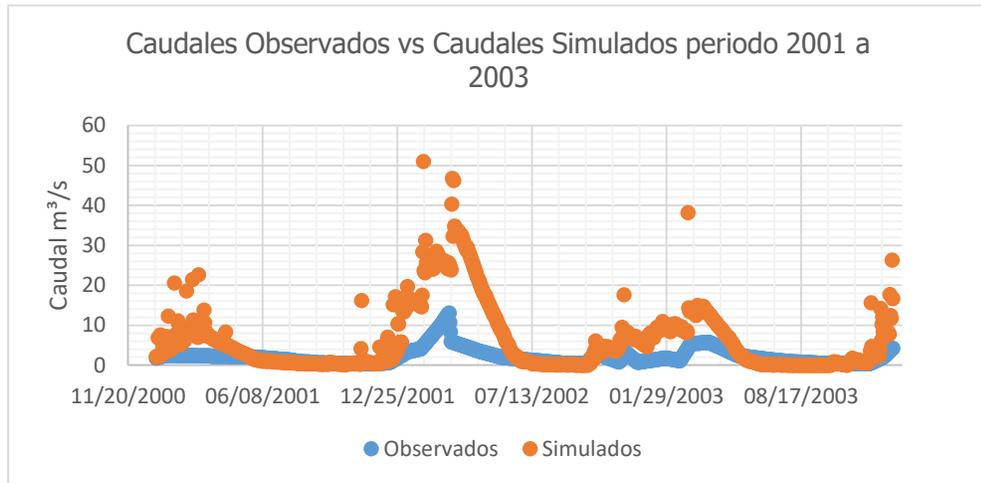


Fuente: Elaboración propia, en base a resultados de SWAT

4.3 Resultados de la modelación en el periodo 2001 a 2003

En la siguiente figura se presenta la correlación de simulados con los observados para un periodo de 2001 a 2003, en lo cual se puede observar o evidenciar un comportamiento similar, como así también hay picos altos que no coinciden con la correlación de los caudales conservados.

Gráfico 6: Comparación de caudales observados vs simulados

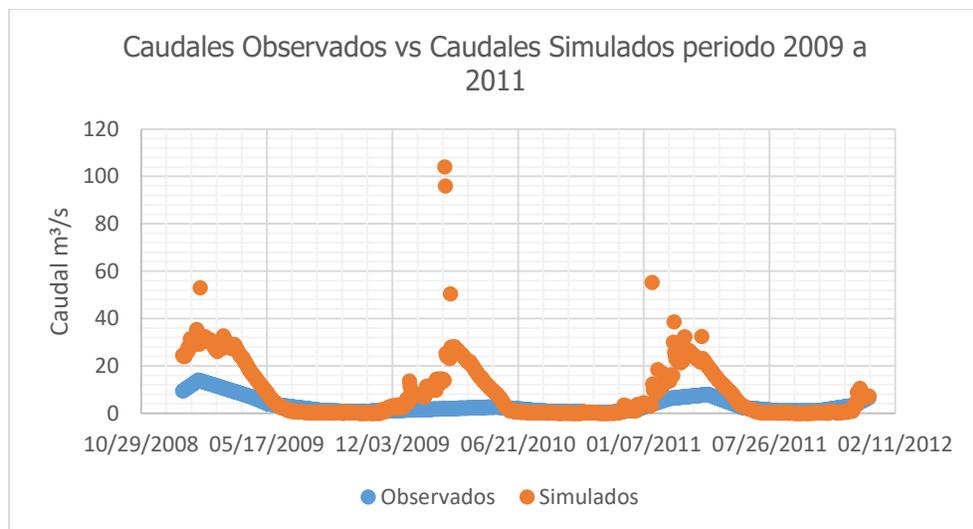


Fuente: Elaboración propia, en base a resultados de SWAT

4.4 Resultados de la modelación en el periodo 2009 a 2011

En este periodo 2009 -2011 se presenta una correlación de los datos observados una mejor mejoría eso al caudal simulado mencionado anteriormente. Sin embargo, se puede observar picos muy elevados en los que no coincide con los caudales (observados y simulados) esto debido a la precipitación elevada en esas fechas.

Gráfico 7: Comparación de caudales observados vs simulados



Fuente: Elaboración propia, en base a resultados de SWAT

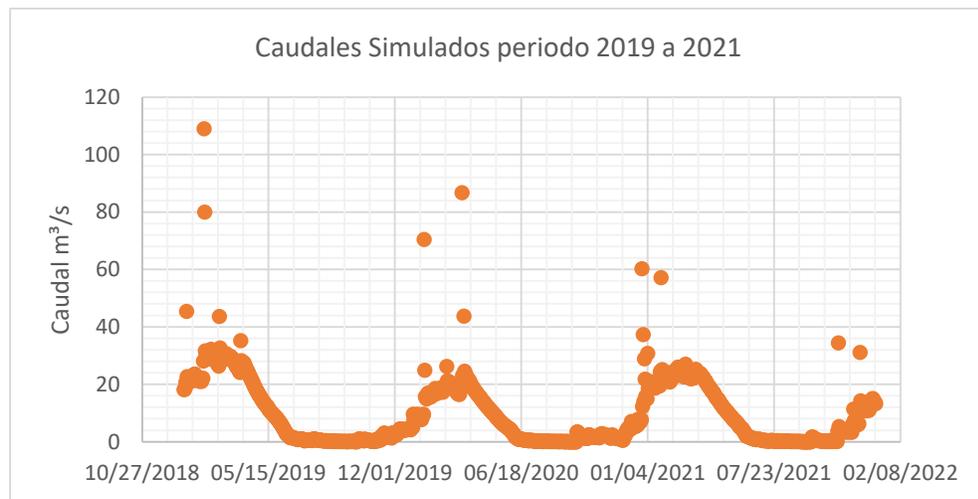
4.5 Resultados de la modelación en el periodo 2019 a 2021

En este periodo no hay una data de caudales observados por esta razón no se puede hacer una comparación de los caudales, cabe mencionar que el coeficiente de bondad de Nash se obtuvo un valor de (muy bueno)

Se puede observar que también hay picos altos esto es debido a que en esas fechas había una elevada precipitación por esta razón es que se obtuvo picos altos.

Por esta razón este periodo se tomará en cuenta en el análisis para poder continuar con el estudio de la cuenca alta del río Guadalquivir.

Gráfico 8: Caudales simulados con el Modelo SWAT



Fuente: Elaboración propia, en base a resultados de SWAT

4.6 Calibración del Modelo hidrológico

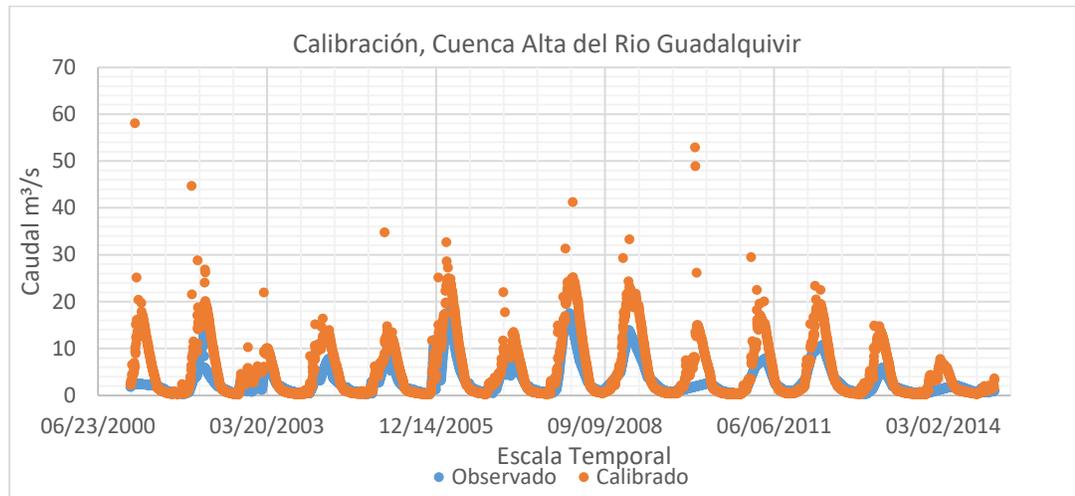
En la calibración se tomará en cuenta los periodos 2001 a 2014 en el cual se observa una disminución de los picos ya tendiendo a la forma de los datos observados, al hallar el coeficiente de bondad de Nash se obtuvo un valor (muy bueno).

La calibración se llevó acabo con 100 simulaciones tomando en cuenta los valores de mayor sensibilidad, por lo que se Observa la calibración fue satisfactoria.

Se puede observar que los picos bajaron y que llevan una tendencia similar donde hay picos en los caudales observados también se generan picos en los caudales calibrados por

esta razón se procede a seguir con el análisis de la multitemporal del cambio de la cobertura vegetal en la generación de caudales en la zona de estudio.

Gráfico 9: Caudales calibración vs observados en los periodos del 2001 a 2014



Fuente: Elaboración propia, en base a resultados de SWAT-CUP

4.7 Correlación de caudales simulados con la variación de la cobertura vegetal en la cuenca Alta del Río Guadalquivir

Considerando que el objetivo principal del presente estudio es la verificación y el análisis del cambio de cobertura vegetal en la generación de caudales en la cuenca alta del río Guadalquivir es indispensable analizar la escorrentía generada y su relación con la precipitación en los periodos de análisis, de tal manera hacer la correlación de las coberturas de la cuenca alta del río Guadalquivir.

4.8 Análisis para el período 2001-2002

De acuerdo a la tabla 15 la información arrojada por el modelo se tiene que para el periodo 2001 a 2002, observando la escorrentía total es de 669.52 mm de un total de precipitación de 1735.69 mm.

Se considera que este primer periodo de los otros dos periodos en analizar, no tendrá un análisis de escorrentía con la variación de las coberturas vegetales, esto debido que es

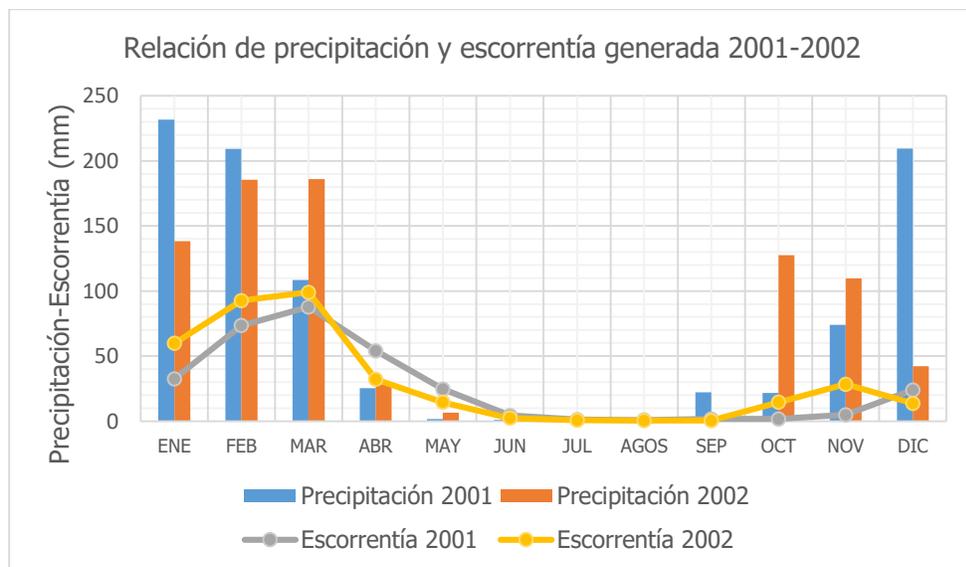
el periodo de partida, tomando en cuenta que su CNII determinado por SWAT para este periodo es de 65.72.

Tabla 15: Precipitación y Escorrentía para el análisis en el periodo 2001-2002

| Numero | mes | Precipitación (mm) | Escorrentía (mm) | Numero | Mes | Precipitación (mm) | Escorrentía (mm) |
|--------------|------------|--------------------|------------------|--------------|------------|--------------------|------------------|
| 1 | enero | 231.67 | 32.48 | 1 | enero | 138.31 | 59.76 |
| 2 | febrero | 209.22 | 73.47 | 2 | febrero | 185.59 | 92.71 |
| 3 | marzo | 108.60 | 87.75 | 3 | marzo | 186.00 | 98.96 |
| 4 | abril | 25.39 | 53.96 | 4 | abril | 28.08 | 32.12 |
| 5 | mayo | 1.60 | 24.68 | 5 | mayo | 6.40 | 14.51 |
| 6 | junio | 1.24 | 4.41 | 6 | junio | 0.55 | 2.25 |
| 7 | julio | 0.00 | 1.25 | 7 | julio | 0.00 | 0.74 |
| 8 | agosto | 2.68 | 0.85 | 8 | agosto | 0.00 | 0.48 |
| 9 | septiembre | 22.14 | 1.65 | 9 | septiembre | 3.70 | 0.43 |
| 10 | octubre | 21.60 | 1.71 | 10 | octubre | 127.51 | 14.49 |
| 11 | noviembre | 73.99 | 4.90 | 11 | noviembre | 109.61 | 28.36 |
| 12 | diciembre | 209.55 | 23.91 | 12 | diciembre | 42.24 | 13.69 |
| Total | | 907.69 | 311.02 | Total | | 828.00 | 358.50 |
| | | Promedio | | | | Promedio | |
| 2001 | | Escorrentía (mm) | 25.92 | 2002 | | Escorrentía (mm) | 29.88 |

Fuente: Elaboración propia, en base a los resultados del modelo SWAT

Gráfico 10: Precipitación y Escorrentía periodos 2001-2002



Fuente: Elaboración propia, en base a los resultados del modelo SWAT

4.9 Análisis para el período 2009-2010

Según la información dada por el modelo SWAT en la siguiente tabla en los periodos del 2009 a 2010 la escorrentía es 462.2 mm del total de la precipitación que tiene un resultado de 1345.45 mm, esto quiere decir que disminuye con la temporalidad anterior.

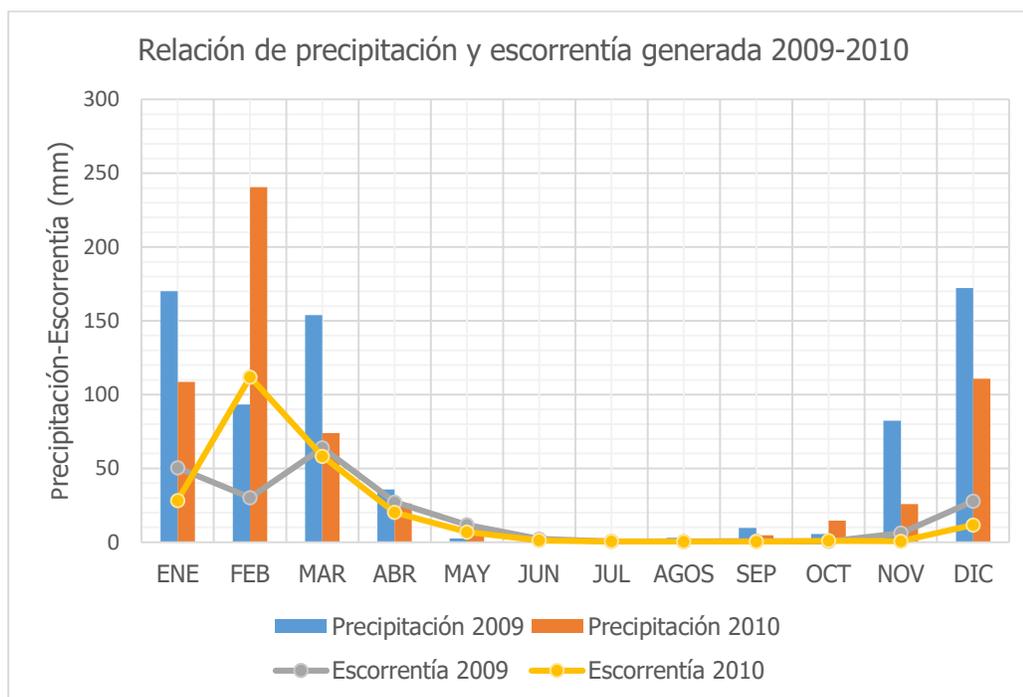
Con respecto a la escorrentía generada con la variación de la cobertura vegetal hubo una disminución de pradera de 60% a 48% y hubo un aumento de vegetación desnuda pasando de 17% a 33%, por esta razón bajo la escorrentía por que la mayor parte de la cuenca en estudio son praderas por tal motivo el CNII de esta temporalidad es de 63.43.

Tabla 16: : Precipitación y Escorrentía para el análisis en el periodo 2009-2010

| Numero | mes | Precipitación (mm) | Escorrentía (mm) | Numero | Mes | Precipitación (mm) | Escorrentía (mm) |
|--------------|------------|-----------------------|---------------------|--------------|------------|-----------------------|---------------------|
| 1 | enero | 170.03 | 50.48 | 1 | enero | 108.51 | 28.26 |
| 2 | febrero | 93.24 | 30.19 | 2 | febrero | 240.63 | 111.88 |
| 3 | marzo | 153.84 | 63.95 | 3 | marzo | 73.85 | 58.17 |
| 4 | abril | 35.73 | 27.20 | 4 | abril | 26.31 | 20.11 |
| 5 | mayo | 2.48 | 11.78 | 5 | mayo | 8.92 | 6.90 |
| 6 | junio | 0.50 | 2.10 | 6 | junio | 2.77 | 1.17 |
| 7 | julio | 0.14 | 0.54 | 7 | julio | 0.00 | 0.56 |
| 8 | agosto | 2.97 | 0.43 | 8 | agosto | 0.00 | 0.35 |
| 9 | septiembre | 9.59 | 0.78 | 9 | septiembre | 4.64 | 0.34 |
| 10 | octubre | 5.53 | 0.49 | 10 | octubre | 14.50 | 0.92 |
| 11 | noviembre | 82.33 | 6.16 | 11 | noviembre | 25.82 | 0.65 |
| 12 | diciembre | 172.26 | 27.70 | 12 | diciembre | 110.84 | 11.60 |
| Total | | 728.650 | 221.810 | Total | | 616.800 | 240.910 |
| | | Promedio | | | | Promedio | |
| 2009 | | Escurrimiento (mm) | 18.483 | 2010 | | Escurrimiento (mm) | 20.076 |

Fuente: Elaboración propia, en base a los resultados del modelo SWAT

Gráfico 11: Precipitación y Escorrentía periodos 2009-2010



Fuente: Elaboración propia, en base a los resultados del modelo SWAT

4.10 Análisis para el período 2020-2021

De acuerdo a la información dada por el modelo SWAT en la siguiente tabla en los periodos del 2020 a 2021 la escorrentía total es de 635.85 mm del total de la precipitación que tiene un resultado de 1706.06 mm, esto quiere decir que hay un aumento con la temporalidad anterior.

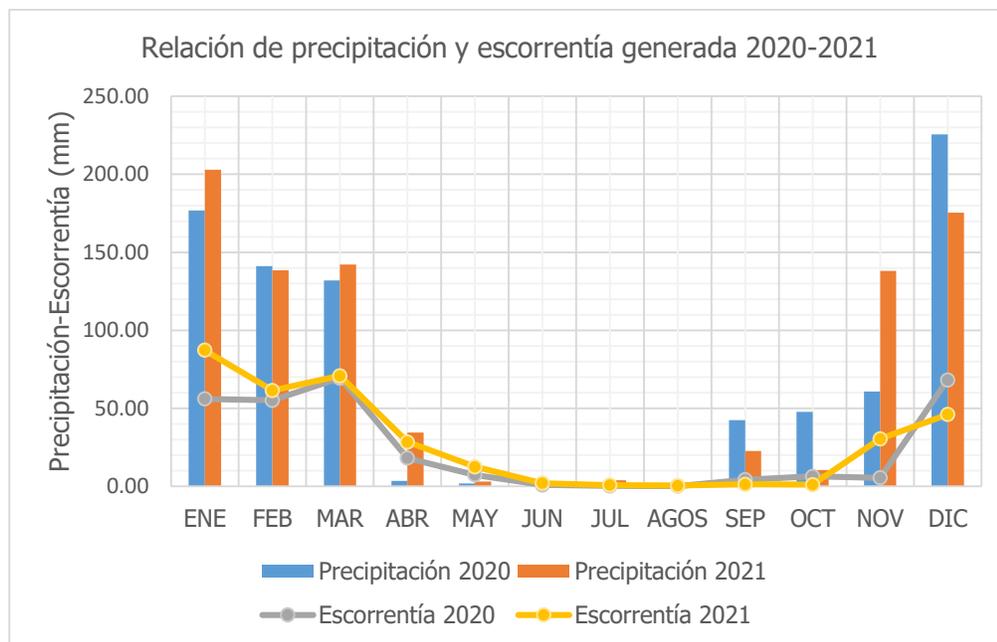
Con respecto a la escorrentía generada con la variación de la cobertura vegetal hubo una disminución de vegetación desnuda de 33% a 20% y hubo un aumento de praderas pasando de 48% a 68%, pero a su vez hubo una disminución de las zonas agrícolas de 14% a 5%, por esta razón aumento la escorrentía, el CNII calculado de esta temporalidad es de 65.03.

Tabla 17: Precipitación y Escorrentía para el análisis en el periodo 2020-2021

| Numero | mes | Precipitación (mm) | Escorrentía (mm) | Numero | Mes | Precipitación (mm) | Escorrentía (mm) |
|--------------|------------|--------------------|------------------|--------------|------------|--------------------|------------------|
| 1 | enero | 176.83 | 56.07 | 1 | enero | 202.98 | 87.27 |
| 2 | febrero | 141.16 | 55.20 | 2 | febrero | 138.53 | 61.53 |
| 3 | marzo | 131.91 | 69.46 | 3 | marzo | 142.16 | 70.92 |
| 4 | abril | 3.58 | 18.16 | 4 | abril | 34.46 | 28.48 |
| 5 | mayo | 1.97 | 7.41 | 5 | mayo | 3.16 | 12.54 |
| 6 | junio | 2.26 | 1.00 | 6 | junio | 0.00 | 2.10 |
| 7 | julio | 0.00 | 0.38 | 7 | julio | 3.93 | 0.81 |
| 8 | agosto | 0.00 | 0.26 | 8 | agosto | 0.00 | 0.51 |
| 9 | septiembre | 42.48 | 4.34 | 9 | septiembre | 22.62 | 1.39 |
| 10 | octubre | 47.75 | 6.41 | 10 | octubre | 10.38 | 1.11 |
| 11 | noviembre | 60.76 | 5.55 | 11 | noviembre | 138.11 | 30.53 |
| 12 | diciembre | 225.65 | 68.27 | 12 | diciembre | 175.38 | 46.15 |
| Total | | 834.34 | 292.5 | Total | | 871.72 | 343.35 |
| | | Promedio | | | | Promedio | |
| | | Escurrimiento | | | | Escurrimiento | |
| 2020 | | (mm) | 24.38 | 2021 | | (mm) | 28.61 |

Fuente: Elaboración propia, en base a los resultados del modelo SWAT

Gráfico 12: Precipitación y Escorrentía periodos 2020-2021



Fuente: Elaboración propia, en base a los resultados del modelo SWAT

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

En conclusión, el modelo SWAT y el análisis multitemporal de la cobertura vegetal y el uso de suelo en la generación de los caudales, se evidencia que hay una variación en los caudales puesto que en varias zonas hay cambios de cobertura considerable por esta razón las escorrentías y los números de curvas calculados varían, en el periodo de 2001 se calcula un valor de escorrentía 669.56 mm y CNII de 65.72, en el periodo 2010 hay una disminución de la escorrentía de 462.2 mm con un CNII de 63.43, en el periodo 2021 se calcula un aumento del escurrimiento total de 635.85 mm con un CNII de 65.03, esto se evidencia que a mayor número de curva es mayor la escorrentía.

El análisis de los del cambio de cobertura vegetal se tomó en cuenta la sub cuenca de La Victoria ya que es una de las más importantes de la cuenca alta del río Guadalquivir tomando en cuenta que se obtuvo un alrededor del 85 combinación de cambio de cobertura y uso de suelo en los periodos de estudio ya mencionados anteriormente, en la siguiente tabla se muestra el cambio que existe en los periodos de estudio.

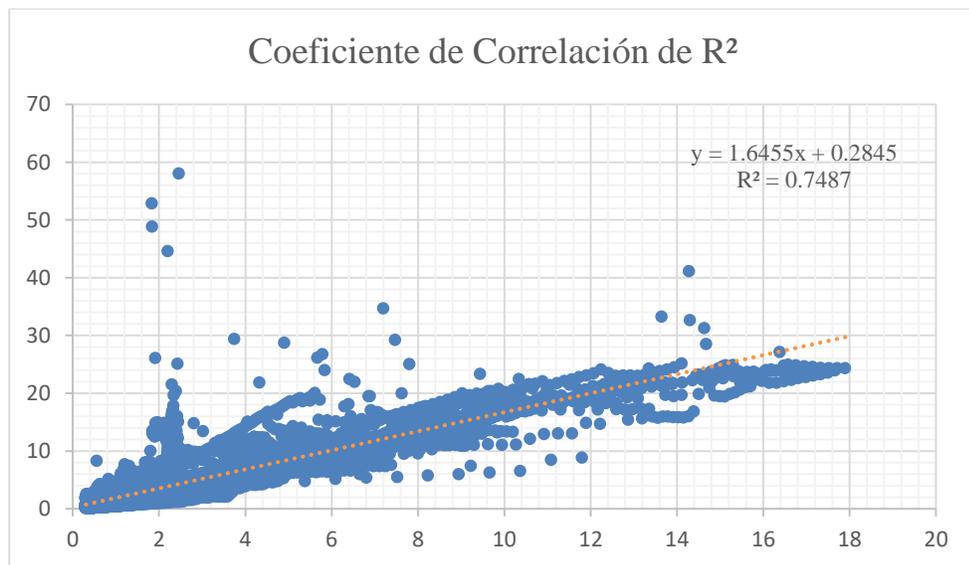
| Nº | Antes y Luego de la cobertura 2001 – 2010 - 2021 | Área (ha) |
|----|---|-----------|
| 1 | PAST - AGRL - PAST | 1274.10 |
| 2 | HAY - HAY - PAST | 617.51 |
| 3 | PAST - HAY - PAST | 604.81 |
| 4 | PAST - RNGE - PAST | 231.37 |

Una de las limitantes para el presente estudio es la falta de información, los datos que se mencionarán a continuación son las limitantes que se presentaron, el de la cobertura vegetal y uso de suelo ya que se pudo obtener solo para los periodos 2001, 2010 y 2021, no se cuenta con más información a nivel nacional, otra de las limitantes es la información climatológica como los datos de radiación solar, velocidad de viento y humedad relativa esta última solo se encontró en tres estaciones pero no cumplen por la data faltante, excede los límites para tomarlo en cuenta.

Para los periodos 2020 a 2021 no se hizo una comparación de la gráfica de caudales observados vs caudales simulados ya que no se contó con data observada pero igual manera se tomó en cuenta en el análisis por los resultados de los anteriores según correlación de Nash-Sutcliffe salieron (muy bueno) que con ese valor era suficiente para poder tomarlo en cuenta para dicho análisis.

Por último, para la calibración y validación del modelo hidrológico se consideró el coeficiente de correlación R^2 que mide la variabilidad de los datos observados con los simulados, se tomó en cuenta para la calibración del periodo 2001 a 2014, en esos periodos se cuenta con data observada y completada se observó que se ajusta de buena manera teniendo un valor de 0.7487 considerado muy bueno.

Gráfico 13: Coeficiente de correlación R^2 del periodo de calibración



Fuente: elaboración, en base a los resultados de calibración Swat cup

5.2 Recomendaciones

Se recomienda tener los datos adecuados y actualizados por parte de las entidades que otorgan los datos de entrada para el modelo de la zona de estudio, para tener una adecuada modelación y a su vez unos resultados buenos y acordes con los datos aforados u observados.

Es de importancia tener los datos completos como los datos de precipitación, temperaturas máximas, temperaturas mínimas como las más importantes, con los datos complementarios la radiación solar velocidad de viento y humedad relativas SWAT para una buena modelación ya que el modelo tiene una base de datos a nivel mundial que con eso datos te arroja resultados acordes y coherentes a los datos observados de caudales para dicha validación.

El programa SWAT es un programa muy secuencial ya que toda la información tiene que estar adecuadamente tabulada al formato que requiere el modelo porque si algo no está en su formato nos sale error en alguno de los pasos no se puede continuar ni avanzar por esta razón se tiene que ser minucioso en ordenar y formato de los datos cabe mencionar también que si no hay un buen manejo de los datos SWAT te puede arrojar resultados incoherentes.