

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN.

El agua es un recurso vulnerable y finito, esencial para la conservación de la vida, el desarrollo y el medio ambiente, con gran valor social y económico en todos sus usos, los que pueden ser diferentes ya sea para la agricultura, los ecosistemas saludables o para los seres humanos y su sustento. La Reserva Biológica Cordillera de Sama (RBCS) es la principal fuente de agua del Valle Central de Tarija, presenta cuencas y micro-cuencas que proveen de agua, teniendo como principal beneficiario a la ciudad de Tarija, poblaciones aledañas y al altiplano tarijeño. En el presente estudio se pretende analizar la influencia del incendio de Sama en la disponibilidad del recurso hídrico en la Cuenca río La Victoria (perteneciente a la RBCS) mediante el método de humedad de suelo de WEAP.

El interés del presente trabajo es debido a que en los últimos años la región del Valle Central se ha visto afectada por la ocurrencia de incendios que influye en la oferta hídrica superficial de las cuencas de la región. La cuenca del río Victoria es la más importante del Valle Central de Tarija, sus aguas alimentan en gran parte a toda la población de dicha ciudad.

Debido al potencial hídrico que representa la cuenca el estudio permitirá analizar la respuesta hídrica ante los cambios que se dan debido a los incendios en dicha área, además el objeto de construir un modelo hidrológico con el Water Evaluation And Planning System (WEAP)¹ es obtener una herramienta que presente un enfoque de planificación, protección y conservación del uso de suelo y vegetación de la cuenca, con la finalidad de que se traduzcan en acciones concretas de toma de decisiones para precautelar la seguridad del agua para las generaciones actuales y futuras mediante leyes que salvaguardan la RBCS, de posibles futuros incendios.

1.2. ANTECEDENTES.

Debido a su posición geográfica, la Cordillera de Sama, es uno de los lugares en el departamento de Tarija más afectados por los incendios forestales. Las causas de esta incidencia son múltiples, aunque están íntimamente ligadas a las características climáticas de su ámbito agro ecológico: altas

¹ Sistema de Evaluación y Planificación del Agua (WEAP)

temperaturas y escasas precipitaciones, que implican un notable estrés hídrico para la vegetación, especialmente durante la época de calor.

Además de estos factores "naturales", hay que considerar la gran influencia del hombre sobre el medio. Muchos de los incendios forestales se relacionan con acciones antrópicas, cuando son provocados por la propagación del fuego producido por la quema o "chaqueo", o fruto de la actuación incontrolada de pirómanos, que constituyen en definitiva negligencias o descuidos.

La proximidad temporal de la ocurrencia de dos grandes incendios en la Cordillera de Sama (2002, 2017-2018), pone de manifiesto las nefastas consecuencias que produce este fenómeno.

Durante los días 19 y 21 de agosto del año 2002, la Cordillera de Sama fue afectada por un incendio de magnitud que consumió 18.000 hectáreas de su superficie. Las llamas llegaron a tan solo cuatro kilómetros de los barrios periféricos de la ciudad de Tarija, causando conmoción y pánico entre sus pobladores, sin embargo, el fuego llegó hasta las zonas de pastoreo en las comunidades locales. (Franco Berton, 2017)

En aquella oportunidad, según con el reporte de AMANDES SRL (2018).², se había perdido el 100% de la cobertura vegetal de 17.758 has (16% del Área Protegida), estimándose una disminución del 5% de la capacidad productora de agua de la Cordillera de Sama y un número importante de población limitados en el acceso al agua para consumo humano. Así mismo, se había evidenciado la destrucción de hábitats para la fauna silvestre, pérdida de paisaje y forraje de 11.000 cabezas de ganado, afectando la vida de unas 1160 familias campesinas.

Aproximadamente 15 años después de aquel desastre, la misma Cordillera de Sama sufre otro incendio forestal que destruye más de 10.600 hectáreas de esta reserva biológica.

Según informe sobre incendio del SERNAP (2017), los daños ambientales corresponden al 100% de la cobertura vegetal. Afectando el 87% dentro de la Reserva de Sama y un 13 % en la zona de amortiguamiento.

Según el reporte de la Universidad Autónoma "Juan Misael Saracho", la superficie afectada por el incendio fue de 12.675 ha de las cuales 10.932 ha se encuentran dentro de la Reserva y 1.743 ha están fuera de la Reserva.

² Informe sobre el incendio ocurrido en la Reserva de Sama entre el 17 y 20 de agosto. SERNAP 2017

De acuerdo con el reporte de la Universidad Autónoma “Juan Misael Saracho”, han sido afectadas 311 ha de bosques naturales, 313 ha de matorral-pastizal, 6.490,00 ha de vegetación herbácea con arbustos, 5.441,00 ha de vegetación herbácea, 15,50 ha de cultivos agrícolas y 4,40 ha de plantaciones de pino.

De acuerdo con un reporte de Berton F. (2017)³, el desastre fue provocado por una quema de basura en una comunidad cercana, en la zona de amortiguamiento, quema que se salió de control y cobró la vida de tres personas que murieron tratando de combatir el fuego. 1.479 personas fueron atendidas en centros médicos y 3.000 familias de comunidades campesinas dedicadas a la agricultura y cría de animales domésticos, perdieron sus animales y cosechas.

Entre los impactos del incendio, según esta misma fuente, ocasionará impactos en los recursos hídricos de la Cordillera de Sama, ya que al tratarse de zonas montañosas existirá un impacto en la capacidad de retención de agua de este ecosistema en la época de lluvia. “El fuego en sí volatiliza los micronutrientes, además de los impactos en biodiversidad, y reduce la capacidad de infiltración. También, incrementa la escorrentía y la remoción de suelos, algo que va a generar impactos inclusive fuera del ecosistema, afectando la cuenca baja, una vez lleguen las próximas lluvias en Sama”.

El reciente incendio ocurrido el 10 de junio de 2018, según algunos reportes se había iniciado en la comunidad de Pinos Norte, abarcando una superficie de aproximadamente 860,8 ha. La zona afectada corresponde al municipio de Tarija. La mayor parte del área afectada corresponde a la Reserva Biológica Cordillera de Sama. Sobre los daños ambientales y económicos de este incendio, todavía no han sido cuantificados.

La mejor manera de luchar contra los efectos negativos del fuego es evitar que se produzca, y en el caso de que tengan lugar, tratar de controlarlo y extinguirlo en el menor tiempo posible, reduciendo al mínimo las pérdidas potenciales.

Las graves consecuencias que a todos los niveles (ecológico, económico, social y humano) pueden derivarse de un incendio forestal son razones suficientes para dedicar una atención especial a este

³ Bolivia: incendio forestal destruye 10 600 hectáreas de la Reserva Biológica Cordillera de Sama por Eduardo Franco Berton (RAI). 18 agosto 2017. En:<https://es.mongabay.com/2017/08/bolivia-incendio-forestal-destruye-10-600-hectareas-la-reserva-biologica-cordillera-sama/>.

fenómeno. El hombre ha desarrollado numerosos instrumentos y puesto en práctica diversos procedimientos para combatirlos.

Es por eso que el presente estudio, analiza la influencia de los incendios acaecidos en la Cordillera de Sama, en la disponibilidad de recursos hídricos.

1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Una de las mayores preocupaciones que se tiene en la actualidad es la sensibilidad de la disponibilidad de agua ante factores como el crecimiento poblacional y el cambio de uso del suelo principalmente, en este caso ante la acción de incendios forestales.

Los efectos de un incendio forestal implican variaciones en la temperatura, cambios en la precipitación y cambios en la cobertura vegetal lo cual puede ocasionar, a mediano plazo, mayor frecuencia de sequía, influyendo en la disponibilidad del agua (Chávez Jiménez, 2013, pág. 84).

Debido a que el agua es un elemento esencial para los seres vivos y además de cumplir la función de mantener la integridad del entorno natural, se considera un recurso hídrico indispensable de incalculable valor tanto económico y ecológico, representando un reto para el desarrollo socio-económico a nivel mundial. Su disponibilidad al enfrentarse a una oferta que disminuye frente a una demanda creciente doméstica e industrial, se ve afectada por factores como los cambios demográficos, uso del suelo, cambios en el clima e incendios forestales, que inciden en la cantidad de agua disponible en el futuro. Estos factores perjudican la cantidad y calidad de agua en una cuenca hidrográfica, siendo el incendio forestal el fenómeno de mayor importancia en el presente estudio.

Existe una preocupación por los efectos mundiales en los recursos hídricos por la variabilidad climática y el cambio climático lo cual demandará una mejor gestión del agua para enfrentar los incendios forestales, que, repercutirán significativamente en la disponibilidad de los recursos hídricos, condicionando el uso del agua para las generaciones futuras.

Estos cambios podrían afectar a los residentes de las tierras bajas que se benefician de los bienes y servicios de esta cuenca (río La Victoria).

1.4. OBJETIVOS.

1.4.1. Objetivo General.

- Analizar el impacto de los incendios forestales sobre la oferta hídrica superficial de la cuenca del río La Victoria a través del modelo hidrológico Water Evaluation and Planning (WEAP), para una mejor gestión de la cuenca.

1.4.2. Objetivos específicos.

- Caracterizar espacialmente y temporalmente el incendio forestal producido en el año 2017 en la Reserva Biológica de Sama.
- Estimar el cambio y recuperación de la cobertura vegetal post-incendio.
- Evaluar la información climatológica e hidrométrica disponible de fuentes locales y nacionales para su incorporación al modelo.
- Calibrar y validar el modelo WEAP a través de la modificación de los parámetros de calibración aplicando el método de modelación hidrológica humedad del suelo.
- Determinar el impacto del incendio forestal sobre la oferta hídrica superficial, mediante comparación de resultados pre y post-incendio.

1.5. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO.

Los impactos de crecimiento de población y cambio de uso de suelo por acciones de incendios y deforestación de la cobertura vegetal, generan cambios negativos sobre la producción de recursos hídricos, estos impactos negativos están generando preocupación en la población de la ciudad de Tarija y, principalmente, en la Cooperativa de Servicios de Agua y Alcantarillado de Tarija (COSAALT R.L.), que es la actual cooperativa de gestión y distribución de agua potable en Tarija.

La mayor necesidad es identificar la afectación del incendio en la Cuenca río la Victoria es conocer la magnitud del daño en cuanto a los recursos hídricos que dispone la zona, que son aprovechados por la misma ciudad de Tarija y, así, poder tomar medidas de precaución necesarias al caso.

Por esta razón, la importancia de este estudio radica en identificar (incendios) como factores que pueden estar influyendo en la oferta y demanda de agua, lo cual podría servir para la toma de decisiones con respecto a la planificación y gestión del agua en la actualidad y en el futuro de la cuenca, por parte de la alcaldía municipal. Además, servirá como instrumento para formular

políticas y medidas para aumentar la oferta y disminuir la demanda, para un uso sustentable del agua en la actualidad y en el futuro.

1.6. ALCANCE.

Esta investigación tiene como propósito analizar el impacto de los incendios forestales en la oferta hídrica superficial de la cuenca del río La Victoria. Se utilizará el Modelo de Evaluación y Planificación del Agua WEAP para evaluar los efectos del incendio suscitado en agosto del año 2017 sobre la oferta hídrica superficial, con el fin de mejorar la gestión y la planificación de la cuenca.

La investigación se centrará en el análisis del incendio forestal (2017) y su influencia directa en la oferta hídrica superficial de la cuenca del río La Victoria. Se examinará el impacto del incendio en la vegetación y la escorrentía superficial. No se abordarán otros factores que puedan afectar la oferta hídrica, como la gestión de embalses o la demanda de agua por parte de los usuarios.

El estudio se llevará a cabo en la cuenca del río La Victoria del municipio de San Lorenzo, perteneciente al departamento de Tarija, además se consideran 2 periodos de análisis: Periodo antes del Incendio y un periodo post Incendio con la finalidad de realizar una comparativa.

Para el desarrollo de la investigación se consideran limitaciones de acceso a datos, recursos y tiempo para desarrollar el presente estudio. Además, se reconocerá que otros factores externos al alcance de este estudio, como demanda de agua, pueden influir en la oferta hídrica.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. MARCO NORMATIVO.

2.1.1. Normativa y su relación con la Reserva Biológica Cordillera Sama (RBCS).

La zonificación definida en el Plan de Manejo 2017-2026 para la Reserva ha buscado el mantenimiento de los objetos de conservación, la protección de cuencas y el uso sustentable de los recursos naturales, principalmente en aquellas zonas de mayor presencia de comunidades locales. Las zonas definidas tienen correspondencia plena con el uso actual del suelo y los escenarios de cambio climático, por ello la aplicación de las recomendaciones de uso de cada zona de manejo son altamente viables.

La zonificación de la Reserva Biológica Cordillera de Sama (RBCS), contempló como eje de trabajo el marco regulatorio vigente que rige en el país para el ámbito ambiental, el uso y acceso a recursos naturales, usos de la tierra, ocupación de territorio, ordenamiento territorial y las áreas protegidas. En la Tabla 2.1, se presenta la lista de la normativa vigente contemplada en la zonificación (SERNAP, 2017):

Tabla 2.1. Normativa Legal y su aplicación en la zonificación de la Reserva Biológica de Sama.

| Norma | Artículos |
|---|--------------------|
| Constitución Política del Estado (CPE de 2009) | 342, 346, 380, 387 |
| Ley de Medio Ambiente (Ley N° 1333 de 1992) | 60,43,44 |
| Ley de Derechos de la Madre Tierra (Ley N° 071 de 2010) | 7 |
| Ley Marco de la Madre Tierra y Desarrollo Integral para Vivir Bien (Ley N° 300 de 2012) | 1,3,9,10, 16 |
| Reglamento General de Áreas Protegidas (Ley N° 24781 de 1997) | 1, 7, 20, 31 |
| Regulación del Acceso a la Tierra Decreto Supremo 29215 del 02 de agosto de 2007) | 92 |

Fuente: AMANDES s.r.l., 2018.

La Ley N.º 300, Ley Marco de la Madre Tierra y Desarrollo Integral para Vivir Bien, en su artículo 28, párrafo I en concordancia con el artículo 94, de la Ley de Autonomías y Descentralización “Andrés Babiñez”, establece que el ordenamiento territorial debe integrar la gestión de los “sistemas de vida” en armonía y equilibrio con la Madre Tierra, respetando la cosmovisión de las naciones y pueblos indígenas campesinos, comunidades interculturales y afro bolivianas, cuando corresponda. Los sistemas de vida son los ámbitos territoriales (espacios político- administrativo,

cuencas o regiones), donde interactúan las sociedades o unidades socioculturales con las zonas de vida identificando las relaciones y sistemas más óptimos que puedan desarrollarse como resultado de dicha interacción (SERNAP, 2017).

En el año 1991, se creó la Reserva de Sama, con la categoría de Reserva Biológica, una categoría derivada del sistema de categorización de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN). Mediante esta categoría se intentó otorgar al área, el más alto nivel de protección, con lo que se la destinó a la preservación de ecosistemas naturales poco o nada intervenidos y a la investigación científica, restringiendo incluso el ingreso de visitantes. Estos elementos son los parámetros para hallar una categoría equivalente, similar o por lo menos aproximada a Reserva biológica, dentro de la categorización del Sistema de Áreas Protegidas de Bolivia (DS 24781, 1997).

Los objetivos de creación de la RBCS, tomó las consideraciones del Decreto Supremo No 22721, donde mencionan “Que el Gobierno nacional, preocupado por la grave depredación que sufre la flora y fauna del país, tiene el propósito de lograr su uso sostenido para el mejoramiento de las condiciones de vida, individual y colectiva, mediante la conservación del medio ambiente y la naturaleza con el establecimiento de zonas que permitan el desarrollo de programas experimentales o definitivos de preservación, protección, ordenamiento y manejo de animales silvestres, flora, suelos y aguas; que se ha realizado, cumpliendo esos objetivos, estudios de la zona y área de influencia de la cordillera de Sama, en la provincia Méndez, departamento Tarija, que han revelado la necesidad de adoptar medidas urgentes que eviten continúe el peligroso deterioro de la zona que arriesga la misma existencia de sus ecosistemas y población asentada, razones que justifican su conservación y hacen necesaria la creación de una reserva biológica que incluya toda la zona”.

De esta manera resalta que está inmerso el objetivo de creación del área, en esta consideración inicial del decreto, donde se destaca la importancia de la conservación del sitio, para proteger y conservar sus ecosistemas para beneficio de la población local (SERNAP, 2017).

2.2. MARCO REFERENCIAL.

2.2.1. Aspectos generales de incendios forestales.

2.2.1.1. Influencia de los incendios sobre la escorrentía superficial.

Los incendios forestales pueden generar o producir cambios en el ciclo hidrológico dentro de la cuenca hidrográfica. Por ejemplo, Lloret y Zedler, P. H., 2009, págs. 257-258 señala que la pérdida de vegetación, disminución de la materia orgánica y los cambios en las propiedades del suelo podrían ocasionar una disminución en las tasas de infiltración, disponibilidad de agua y aumento de escurrimiento. Las cenizas pueden aumentar la capacidad de infiltración y prevenir o retrasar la escorrentía hasta ciertas cantidades e intensidades de precipitaciones.

La disponibilidad de agua se ve afectado por la vegetación postincendio, ya que cuando la vegetación se comienza a recuperar, se produce un aumento en el consumo de agua debido a las altas tasas de evapotranspiración. Esta tasa de evapotranspiración varía de acuerdo a la edad de los árboles. La mayor evapotranspiración ocurre en arboles jóvenes (1 a 5 años de edad) causando la disminución en la disponibilidad de agua. En cambio, los árboles viejos presentan una tasa de evapotranspiración baja, debido al lento crecimiento que presentan (Konstantin, 2017, pág. 107).

2.2.1.2. Los incendios forestales.

El concepto de incendio forestal es "el fuego que se extiende sin control sobre un terreno forestal afectando a vegetación que no está destinada a arder". De aquí se deducen sus rasgos fundamentales:

- a) Ausencia de control sobre el fuego, por tanto, la quema de pastos, matorral, o los trabajos de limpieza de montes no son considerados incendios, salvo que el fuego se extienda fuera de la zona sobre la que se pretendía actuar;
- b) Afectación de terrenos forestales, entendiéndose por tal "la tierra en la que vegetan especies arbóreas, arbustivas, de matorral o herbáceas, sea espontáneamente o procedan de plantación, siempre que no sean características del cultivo agrícola o fueren objetivo del mismo". Se excluye la vegetación agrícola y quema de rastrojos, salvo que el fuego exceda el área de actuación.
- c) Un incendio forestal afecta a vegetación que no estaba destinada a arder, provocando una transformación, no prevista del medio.

d) El incendio forestal es una amenaza a la cuenca.

2.2.1.3. Clasificación de incendios.

En este sentido la clasificación de los incendios se establece a partir de dos tipologías: La primera, considera tres tipos diferentes según el piso o estrato vegetal a través del cual se propaga el fuego:

- a) **Incendio de superficie:** Es el más frecuente de todos y suele ser el origen de los demás tipos. El fuego avanza por la superficie del suelo, afectando a combustibles fácilmente inflamables como son los restos vegetales muertos, hojarasca, matorrales, etc., que están en la superficie.
- b) **Incendio de copas:** La transmisión se produce a través de las copas de los árboles. Suelen tener su origen en fuegos de superficie, pero la velocidad de avance es mayor, siempre que exista combustible disponible, ya que a esa altura el viento sopla con mayor fuerza que a nivel del suelo.
- c) **Incendios de subsuelo:** Es un tipo de fuego semioculto, sin llamas y propio de bosques caducifolios. El incendio avanza a través del subsuelo quemando raíces y materia orgánica secas, siendo difíciles de detectar.

Se trata de una clasificación no excluyente, porque pueden darse diferentes tipos de forma simultánea. No obstante, se ha constatado que la mayoría de los incendios comienzan como fuego de superficie y evolucionan a copas si el sotobosque es lo suficientemente denso como para ayudar a las llamas a alcanzar las copas de los árboles.

La segunda clasificación vigente (Vélez Muñoz, 2000, pág. 429) centra su atención en la superficie afectada y, según su extensión diferencia:

- a) **Conatos:** superficie menor de 1 hectárea
- b) **Incendios de pequeña extensión:** entre 1 y 5 hectáreas
- c) **Incendios de mayor extensión:** entre 5 y 500 hectáreas - incendios de gran magnitud: entre 500 y 1000 hectáreas
- d) **Grandes incendios:** la superficie recorrida por el fuego es superior a 1000 hectáreas

Los dos primeros, de pequeñas dimensiones, suelen corresponder a fuegos de superficie, mientras que en un incendio de mayores proporciones el fuego de copas dificulta enormemente su control y extinción.

2.2.1.4. Como afecta el incendio a la cobertura vegetal y cuánto tarda en recuperar.

La recuperación de la mayor parte de las propiedades de los suelos afectados por incendios puede tardar entre 1 y 5 años.

Para empezar, la regeneración forestal posterior al incendio no es lo mismo que la recuperación forestal. La recuperación supone volver a ver en el paisaje quemado las especies de árboles, arbustos y flores que devoraron las llamas, con la densidad previa al incendio, o al menos con el mismo tipo de flora que había en el lugar. Pero un paisaje puede regenerarse sin poblarse de las especies que preexistían. Así, si el ecosistema lo admite, los robles podrían reemplazar a los pinos, o se pueden plantar matorrales más tolerantes a la sequía que los que necesiten más humedad, en coherencia con las nuevas condiciones de la tierra. Y es que el tipo de comunidad vegetal que recoloniza los bosques quemados depende del clima de una región en los meses y años posteriores al incendio, ya que las temperaturas más altas y la disminución de las precipitaciones pueden comprometer sus posibilidades de recuperación.

En este sentido, un estudio reciente publicado a principios de 2020 en *Ecology Letters*, que examina la recuperación forestal y ha codirigido la Dra. Camille Stevens-Rumann, profesora de la Universidad Estatal de Colorado y ex bombero, tras estudiar cerca de 1.500 sitios de incendios forestales que se incendiaron entre 1988 y 2011, concluyó que el cambio climático fue determinante para la reforestación de los bosques. Detectaron que antes del año 2000, el 70 por ciento de los bosques quemados volvían a ver crecer su árbol dominante anterior, y después de 2000, ese porcentaje cayó al 46 por ciento, y en un tercio de los bosques estudiados no volvieron a crecer los árboles. El equipo investigador afirmó que la tendencia dominante era un clima más cálido y seco después de 2000, que atribuyen al cambio climático.

En cuanto a las tareas específicas de gestión reforestal tras el incendio, se distinguen acciones inmediatas, a corto, medio y largo plazo, en función de su urgencia, y todas se encaminan a evitar la pérdida de suelo y la contaminación de hábitats acuáticos (aguas superficiales y subterráneas, ríos, mares). La recuperación de la mayor parte de las propiedades de los suelos afectados por incendios puede tardar entre **1 y 5 años**, y en las condiciones más desfavorables (por ejemplo, en suelos de zonas con mucha pendiente o donde se haya destruido por completo la materia orgánica), la restauración de la vegetación puede incluso no llegar a producirse nunca debido a la pérdida total del suelo y al afloramiento de la roca.

Las primeras medidas han de procurar la regeneración de la cubierta vegetal, la gestión de las cenizas y la retención de nutrientes, así como la mejora de la estructura del suelo y la regeneración de los microorganismos del suelo. Las acciones a medio plazo, que se conocen como tratamientos de rehabilitación, se desarrollan normalmente al cabo de 1 y 3 años tras el incendio, e incluyen medidas como ayudas a la regeneración natural postincendio de las masas quemadas, plantar más flora, recuperar bosques autóctonos, etc. Por último, las acciones de restauración postincendio se llevan a cabo pasados los 3 años, y tienen como objetivo la recuperación total del ecosistema.

2.2.2. Fundamentos básicos de la hidrología.

2.2.2.1. Balance Hídrico.

Se encarga de cuantificar el ciclo del agua en una determinada zona (ladera, cuenca, región, país) durante un periodo de tiempo previamente establecido (diario, mensual o anual).

El balance hídrico constituye la base para cuantificar la oferta hídrica, teniéndose como resultado el régimen de caudales en su punto de salida, a través del análisis y procesamiento de la información básica disponible: información y datos climatológicos e hidrológicos, evolución del ciclo hidrológico y sus componentes, demanda, componentes de la geografía física como la cartografía temática, topografía, suelos, geología, uso del suelo, delimitación de cuencas y demografía.

El concepto de balance hídrico, que ampliamente se usó en hidrología, puede causar alguna confusión al suponer que la precipitación es igual a la suma de la escorrentía y la evaporación; ya que en muchos casos sucede que las cuencas no tienen un ciclo exclusivo de su entorno, es por ello que el término Ciclo Hidrológico tome el sentido de distribución y movimiento del agua en diferentes fases, bajo y sobre la superficie de la tierra.

2.2.2.2. Ciclo hidrológico.

Se denomina ciclo hidrológico el conjunto de cambios que experimenta el agua en la Naturaleza, tanto en su estado (sólido, líquido y como en su forma (agua superficial, agua subterránea, etc). gaseoso) Es frecuente definir la Hidrología como la ciencia que se ocupa del estudio del ciclo hidrológico. (Chereque Morán, 1989, págs. 1-2)

El ciclo hidrológico (ver figura 2.1) no es nada regular. Una muestra de ello son los periodos de sequías y de inundaciones, que ocurren.



Figura 2.1. Ciclo hidrológico.

Fuente: <https://institutodelagua.es/hidrologia/imagen-do-ciclo-hidrologico/hidrologia/>

A continuación, se describen con mayor detalle las fases del ciclo hidrológico que poseen más relevancia en la modelación hidrológica en general:

2.2.2.2.1. Precipitación.

Es la caída del agua en estado líquido (lluvia) o sólido (nieve y granizo) hacia la superficie terrestre. Es un fenómeno que sucede como producto de la condensación del vapor de agua.

Estos diversos tipos de precipitaciones son normalmente medidos sin efectuar su discriminación por medio de su equivalente en agua.

2.2.2.2.2. Evapotranspiración.

Es la combinación de dos procesos independientes por los cuales se pierde agua, la evaporación del agua de la superficie del suelo y la transpiración de la vegetación, consecuentemente, todos los factores que intervienen en los dos procesos antes mencionados, influirán en la evapotranspiración (Figura 2.2).

- **Evaporación:** Proceso físico por el cual el agua cambia de estado líquido a gaseoso, retornando directamente a la atmósfera en forma de vapor, a partir de superficies de agua

libre como océanos, lagos y ríos, de zonas pantanosas, del suelo, y de la vegetación húmeda.

- Transpiración: Proceso por el cual el agua de la vegetación a través de las hojas de las plantas pasa a la atmósfera en forma de vapor. Naturalmente esta agua tomada por las plantas es, del suelo.

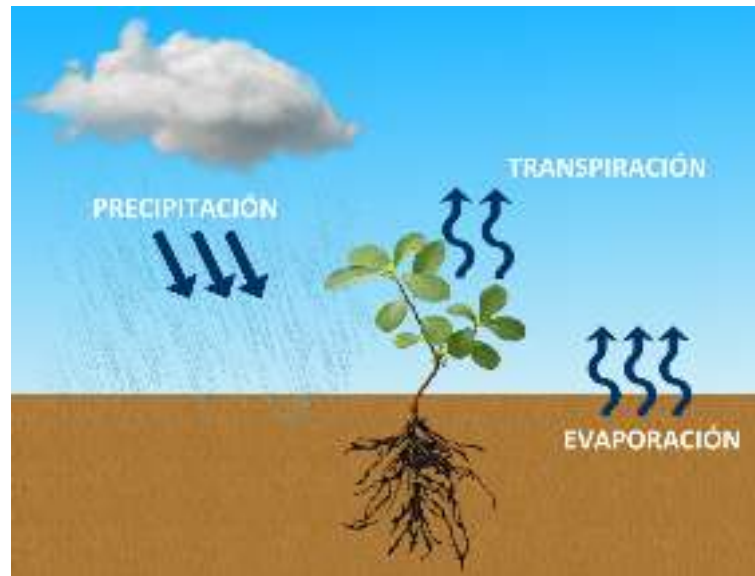


Figura 2.2. Proceso de Evapotranspiración.

Fuente: <https://blog.veto.cl/2020/10/31/la-importancia-de-la-evapotranspiracion-en-la-agricultura/>

- Evapotranspiración potencial. La evapotranspiración potencial de un cultivo de referencia (E_{to}) en mm/d, fue definida por Doorembos y Pruitt (FAO, 2006) como: “La tasa de evaporación en mm/d de una extensa superficie de pasto (grama) verde de 8 a 15 cm de altura uniforme, en crecimiento activo, que sombrea completamente la superficie del suelo y que no sufre escasez de agua”.
- Evapotranspiración de los cultivos. Se estima multiplicando la evapotranspiración potencial por un factor de cultivo K_c .

2.2.2.2.3. Escorrentía.

La Escorrentía es la parte de la Precipitación que llega a alimentar a las corrientes superficiales, continuas o intermitentes, de una cuenca. Existen distintos tipos de escorrentías dependiendo de su procedencia: escorrentía superficial o directa, escorrentía hipodérmica o subsuperficial y escorrentía subterránea.

La escorrentía es el agua excedente de las precipitaciones, que circula sobre el suelo o a través del mismo y llega a los cauces superficiales. Cuanto mayor es la capacidad de infiltración, existe mayor grado de conservación, en consecuencia, la escorrentía es menor y la capacidad de almacenamiento de agua aumenta.

Cuando los suelos tienen una capacidad de infiltración menor que la intensidad de las lluvias y se saturan, se origina de inmediato una escorrentía superficial por falta de infiltración. La escorrentía depende de las siguientes características físicas de la región de estudio:

- Cobertura de la tierra.
- Tipo de suelo.
- Área de drenaje.
- Topografía.
- Almacenamiento (lagos, presas).

2.2.2.2.4. Infiltración.

Se trata de la porción de precipitación que penetra el suelo a través de los poros y fisuras de la superficie del terreno o las rocas, rellenando de agua el medio poroso. Esto es posible gracias a la acción de las fuerzas de gravedad y capilaridad.

Parte del agua que se infiltra, permanece en las capas más superficiales del suelo y puede volver a entrar a un curso de agua debido a que se filtra hacia el mismo. Otra parte del agua puede percolarse a mayor profundidad, recargando así los acuíferos subterráneos.



Figura 2.3. Capacidad de infiltración en diferentes suelos.

Fuente: <https://huertoescolarecologico.wordpress.com/2021/04/19/actividad-permeabilidad-del-suelo-ante-el-agua/>

2.2.3. Modelo matemático.

Un modelo matemático es una representación simplificada, a través de ecuaciones, funciones o fórmulas matemáticas, de un fenómeno o de la relación entre dos o más variables.

2.2.4. Modelo hidrológico.

El modelo hidrológico es una representación simplificada de un sistema real complejo llamado prototipo, bajo forma física o matemática, el sistema real está representado por una expresión analítica. En un modelo hidrológico el sistema físico real que generalmente representamos es la cuenca hidrográfica y cada uno de los componentes del ciclo hidrológico, de esta manera un modelo matemático ayuda a tomar decisiones en materia de hidrología.

Un modelo hidrológico es una simplificación de la realidad, a partir del cual podemos estudiar la causa efecto de una cuenca a través de los datos de entrada y salida, con los cuales se logra un mejor entendimiento de los procesos físicos hidrológicos que tienen lugar dentro de la cuenca.

El objetivo del análisis del sistema hidrológico es estudiar la operación del sistema y predecir su salida. Un modelo de sistema hidrológico es una aproximación al sistema real; sus entradas y salidas son variables hidrológicas mensurables y su estructura es un conjunto de ecuaciones que conectan las entradas y las salidas. Central a la estructura del modelo está el concepto de transformación del sistema.

2.2.5. Clasificación de los modelos.

Los modelos que simulan fenómenos relacionados con recursos hídricos se pueden clasificar en tres grandes categorías: hidráulicos, que corresponden a aquellos que simulan el comportamiento de flujos en los cauces para distintos escenarios; hidrológicos, que simulan la relación entre las características meteorológicas y la escorrentía de una cuenca; y de planificación, que modelan la operación de los sistemas de recursos hídricos de una cuenca.

2.2.5.1. Modelación hidrológica.

La modelación hidrológica se define como el uso de modelos matemáticos conceptuales para la simulación de los procesos de transporte de agua que ocurren dentro de una cuenca. Estos modelos pueden estar basados en las ecuaciones físicas que rigen el comportamiento de las variables dentro de una cuenca o pueden ser de naturaleza conceptual, donde se representan los procesos que

ocurren dentro de la cuenca a través de esquemas y algoritmos simplificados. (Chow, Mays, y Maidment, 1994, pág. 9)

2.3. FUNDAMENTOS DE MODELACIÓN HIDROLÓGICA.

2.3.1. Descripción del Modelo WEAP.

2.3.1.1. Características generales de WEAP.

El modelo WEAP, fue creado en 1988 por Jack Sieber, con el patrocinio de Stockholm Environment Institute (SEI). Es una herramienta de modelación para la planificación y distribución de agua, que opera bajo el modelo de balance hídrico y puede ser aplicado a los sistemas agrícolas. El modelo se distingue por integrar a la simulación componentes naturales (demandas por escorrentía, flujo base) y componentes humanos (demanda humana, embalses).

WEAP permite la planificación de recursos hídricos balanceando la disponibilidad de agua y la demanda. La disponibilidad de agua es analizada a partir de módulos físicos hidrológicos a escala de subcuenca (ríos, arroyos, manantiales, embalses, aguas subterráneas, etc.) y la demanda es analizada a partir de la distribución espacial y temporal de los consumidores con diferentes niveles de prioridades (Sieber y Purkey, 2007, págs. 7-8).

2.3.1.2. Capacidad de un modelo WEAP

- Los datos de entrada al modelo y los resultados generados en los procedimientos de cálculo, permiten contar con una base de datos de las demandas de agua, asignaciones del recurso y estado de las fuentes en un período histórico.
- WEAP permite optimizar y evaluar alternativas de la gestión del agua dentro de la cuenca, por solo citar algunos ejemplos: trasvases de agua, uso de fuentes alternativas, restricción de uso de fuentes o infraestructura de aprovechamiento en épocas del año, prácticas de ahorro, entre otros.
- WEAP permite confeccionar los balances de agua por usuarios, por cultivo agrícola y el balance general de la cuenca; identificando demanda neta y bruta, déficit en el suministro y nivel de cobertura de la demanda.
- La implementación del modelo permite evaluar y trazar las proyecciones de demanda teniendo información de cómo impactan en el estado de las fuentes, revisando su recuperación y analizando distintas variantes de manejo del agua disponible.

- En el modelo pueden evaluarse diferentes reglas de operación de los embalses, que permitan apoyar la adaptación y resiliencia ante situaciones de estrés hídrico como la sequía hidrológica. El análisis de los resultados de WEAP permiten la anticipación, seguimiento y evaluación de la sequía hidrológica
- En zonas agrícolas afectadas por baja disponibilidad, los resultados del modelo permitirían tomar decisiones como el aplazamiento del inicio de la siembra cultivo a la espera de una situación más favorable en la disponibilidad de los recursos hídricos, y en casos extremos decidir no sembrar o sembrar cultivos menos consumidores.
- Analizar calendarios de siembra de cultivos agrícolas y analizar estrategias de rotación de cultivos, todo en base a la sostenibilidad de éstos(as) en función de la disponibilidad de agua.
- Evaluar si los recursos hídricos disponibles en cualquier horizonte de planeación, permitirán sostener los niveles de demanda actual de la agricultura, su crecimiento e incluso cuestionar, en muchos casos, la permanencia de ciertos cultivos o en general de la agricultura como actividad económica a futuro.
- Las evaluaciones en WEAP permiten tener un estimado de los volúmenes de las fuentes en diferentes períodos de planeamiento y su relación con el gráfico de explotación; además permiten evaluar la efectividad para garantizar la entrega de agua a los usuarios.
- A partir de los datos de índices de pérdidas en los sistemas de conducción y de riego, pueden estimarse las pérdidas de agua por campaña de siembra, y al estar declaradas espacialmente puede conocerse donde se producen. Esta información resulta útil para trazar estrategias para reducción de pérdidas en sistemas de riego, evaluar la influencia de una nueva tecnología en el balance de agua e identificar donde resulta más conveniente acometer labores de mantenimiento en sistemas de conducción.
- El modelo permite estimar la disponibilidad del recurso agua actual y frente a escenarios climáticos diversos.

2.3.1.3. Métodos de simulación en procesos hidrológicos.

Actualmente WEAP permite escoger entre cinco métodos de simulación de procesos hidrológicos, la elección del modelo a utilizar estará condicionando con la finalidad del estudio y en algunos casos con la información que se tenga.

A continuación se describen los 5 métodos de modelación en WEAP desde el más simple hasta el más complejo.

- 1. Esgurrimiento de riego (método de coeficiente simplificado).** Es el método más simple, utiliza los coeficientes de los cultivos para calcular la EP/demanda de riego de los cultivos en la cuenca. No simula procesos de escorrentía, infiltración o cambios en la humedad de suelo.
- 2. Solo demandas de lluvia (método de coeficiente simplificado).** También usa los coeficientes de los cultivos, pero simula el resto de la precipitación como escorrentía hacia un río y/o hacia agua subterránea.
- 3. Esgurrimiento de Lluvia (método de la humedad del suelo).** Es más complejo, representa la cuenca con dos capas de suelo, además del potencial para la acumulación de nieve. En la capa superior simula la evapotranspiración, la escorrentía, el interflujo poco profundo y cambios en la humedad del suelo. En la capa inferior del suelo se simula el enrutamiento del caudal base al río y cambio en la humedad de suelo.
- 4. MABIA.** El Método Mabia es una simulación diaria de la transpiración, la evaporación, las necesidades de riego/la programación, el crecimiento del cultivo y los rendimientos.
- 5. Desarrollo de Plantas** (diario; CO₂, efectos de estrés por agua y temperatura). Simula el crecimiento de las plantas, el uso del agua, y el rendimiento utilizando una etapa de tiempo diario.

2.3.1.4. Modelo de escurrimiento de lluvia-método de la humedad del suelo.

Es un modelo unidimensional, el cual consiste en la noción de transferencia de agua entre dos contenedores un balde superior que representa la zona de raíces, y un balde inferior que representa la interacción con el acuífero, los cuales representan la dinámica entre la evapotranspiración, escurrimiento superficial, sub superficial, percolación, para un elemento de análisis o cuenca. (Yates, Sieber, Purkey, y Huber-Lee, 2005, págs. 501-512).

La influencia de embalses, la red de distribución y otras condiciones de operación, se asignan a los puntos de extracción de agua y se incorporan a los cálculos a través de criterios que maximizan la satisfacción de la demanda.

El modelo WEAP, permite dentro de cada unidad hidrológica denominada Catchment, calcular balances de agua de acuerdo a las características de dicha unidad. Para el cálculo de la

evapotranspiración se usa la ecuación de Penman Montienth. La escorrentía superficial se representa a partir de parámetros de resistencia al flujo, inclinación, porosidad entre otras, a partir de ecuaciones empíricas. El flujo vertical entre diferentes capas de suelo se ajusta usando un parámetro de conductividad y parámetros de ajuste que permiten estimar que fracción pertenece al flujo horizontal. (Ver figura 2.4)

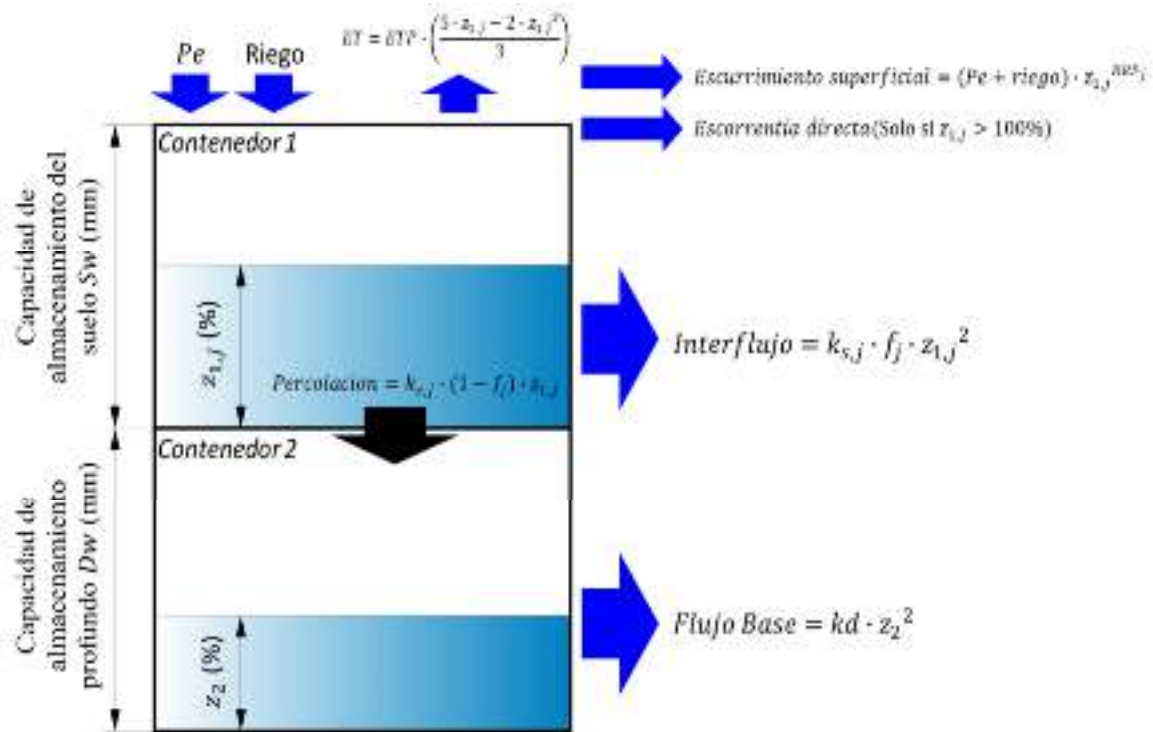


Figura 2.4. Método humedad de suelo.

Fuente: Yates, Sieber, Purkey, y Huber-Lee, 2005.

2.3.1.4.1. Escorrentía superficial.

Flujo sobre el terreno que proviene de la precipitación no infiltrada y que escurre sobre la superficie del suelo y llega a la red de drenaje moviéndose por la superficie del terreno por la acción de la gravedad.

$$Escorrentía\ superficial = (precipitación + riego) \cdot Z_1^{factor\ de\ resistencia\ a\ la\ escorrentia}$$

2.3.1.4.2. Escorrentía directa (solo si $z_1 > 100\%$)

Agua que fluye directamente cuando la humedad en la zona de raíces supera el 100%, su efecto es inmediato.

2.3.1.4.3. Escorrentía subsuperficial.

Es aquél que luego de infiltrarse una determinada cantidad en el perfil del suelo, se manifiesta escurriendo en la primera capa del suelo, y en algunos casos, vuelve a aparecer en superficie, sumándose al superficial.

$$\text{Escorrentía subsuperficial} = (\text{conductividad en la zona de raíces} * \text{Dirección de flujo})z_1^2$$

2.3.1.4.4. Percolación.

Se refiere al paso lento de fluidos a través de materiales porosos, el traspaso del agua superficial que se infiltra a las aguas subterráneas. La percolación está influenciada por la dirección del flujo (f).

$$\text{Percolación} = \text{conductividad en la zona de raíces} (1 - \text{dir. de flujo})z_1^2$$

2.3.1.4.5. Flujo base.

Caudal que circula en la parte profunda del suelo como acuíferos.

$$\text{flujo base} = \text{conductividad en zona profunda} * z_2^2$$

2.3.1.4.6. Ecuación del tanque superior.

El modelo permite dividir la cuenca o sub cuencas (Catchments) en varios elementos N de acuerdo a una característica específica. El modelo realiza un balance en cada sub elemento j de N donde hay un balance hídrico en calculado para cada área fraccional. El clima es uniforme sobre cada área fraccional donde la ecuación de balance de masa continuo se escribe como:

Las ecuaciones del modelo representan el balance entre la entrada y salida del agua, donde la diferencia en cada uno de los contenedores representa los cambios de humedad del suelo. (Yates, Sieber, Purkey, y Huber-Lee, 2005, págs. 501-512).

El balance hídrico es calculado en cada fracción de uso o cobertura j de las i áreas fraccionales que forman parte de cada subcuenca. La ecuación del balance de masa se define asumiendo que las variables climáticas son homogéneas en cada j , de la manera siguiente

$$Sw_j \frac{dz_{1,j}}{dt} = Pe(t) - PET(t) \cdot k_{c,j}(t) \cdot \left(\frac{5z_{1,j} - 2z_{1,j}^2}{3} \right) - Pe(t) \cdot \frac{RRF_j}{z_{1,j}^2} - f_j k_{s,j} z_{1,j}^2 - (1 - f_j) k_{s,j} z_{1,j}^2$$

Tabla 2.2. Definición de términos del balde superior.

| Término | Ecuación |
|--|--|
| 1er término: Cambio en la humedad en un suelo j. | $Sw_j \frac{dz_{1,j}}{dt}$ |
| 2do término: Precipitación efectiva incluye riego y derretimiento. | $Pe(t)$ |
| 3er término: Evaporación potencial. | $PET(t) * k_{c,j}(t) * \left(\frac{5z_{1,j} - 2z_{1,j}^2}{3} \right)$ |
| 4to término: Escorrentía superficial. | $Pe(t) * \frac{RRF_j}{z_{1,j}^2}$ |
| 5to término: Flujo intermedio. | $f_j k_{s,j} z_{1,j}^2$ |
| 6to término: Percolación. | $(1 - f_j) k_{s,j} z_{1,j}^2$ |

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de bibliografía.

El escurrimiento superficial y de inter flujo RT se define en la siguiente expresión:

$$RT(t) = \sum_{j=1}^N A_j \left(Pe(t) \cdot z_{1,j} \frac{RRF_j}{2} + f_j \cdot k_{s,j} \cdot z_{1,j}^2 \right)$$

Tabla 2.3. Definición de parámetros del balde superior y descripción WEAP.

| Variable | Definición | Descripción WEAP |
|-----------------|---|--|
| $k_{c,j}(t)$ | Coefficiente de cobertura vegetal en un suelo j. | Coefficiente de cultivo. |
| Sw_j | Capacidad de almacenamiento en zona de raíces. | Capacidad de agua de suelo. |
| RRF_j | Es el factor de resistencia de escurrimiento para cada fracción de cobertura. | Factor de resistencia a la esorrentía. |
| $K_{s,j}(t)$ | Estimación de la conductividad en la zona de raíces saturada espacio (mm/paso de tiempo). | Conductividad en zona radicular. |
| f_j | Coefficiente de partición o división relacionado al suelo, tipo de cobertura, y la topografía que fraccionan el agua en dos componentes, vertical y horizontal. | Dirección preferencial del flujo. |
| $Z_{1,j}$ | Almacenamiento relativo dado como fracción del almacenamiento total en la zona de raíz (inicial). | Z_1 inicial. |

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de bibliografía.

2.3.1.4.7. Ecuación del tanque inferior.

El modelo permite definir escurrimiento dirigido hacia elementos como ríos y acuíferos. Para los casos en que no se tiene estas condiciones, el flujo base del segundo contenedor es estimado con la siguiente ecuación:

$$Dw_j \frac{dz_{2,j}}{dt} = -k_d z_{1,j}^2 + (1 - f_j) k_s z_{2,j}^2$$

Tabla 2.4. Definición de términos.

| Término | Ecuación |
|---|----------------------------|
| 1er término: Flujo de entrada en el balde inferior. | $Sw_j \frac{dz_{1,j}}{dt}$ |
| 2do término: Flujo base. | $k_d z_{1,j}^2$ |
| 3er término: Percolación. | $(1 - f_j)k_s z_{2,j}^2$ |

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de bibliografía.

Tabla 2.5. Definición de variables del balde inferior.

| Variable | Definición | Descripción WEAP |
|----------|--|-----------------------------|
| Dw_j | Capacidad de almacenamiento en zona profunda. | Capacidad de agua profunda. |
| kd | Tasa de conductividad de almacenamiento inferior. | Conductividad profunda. |
| Z_2 | Almacenamiento es relativo dado como fracción del almacenamiento total en zona profunda. | Z_2 inicial. |

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de bibliografía.

$$S_{max} \frac{dz_2}{dt} = \left(\sum_{j=1}^N (1 - f_j) \cdot k_{s,j} \cdot z_{1,j}^2 \right) - k_{s2} \cdot z_2^2$$

Debido a que en el tanque superior hay una capacidad de almacenamiento y tiene una conductividad el tanque inferior también tiene una capacidad de almacenamiento en la zona profunda y a su vez tiene una conductividad que gobierna el flujo base.

Donde el flujo de entrada hacia este balde, S_{max} es la percolación desde el balde superior dado en la ecuación de Sw_j , y k_d es la conductividad saturada en el balde inferior (mm/paso de tiempo de simulación), la cual está dada como un valor general para la cuenca (no lleva subíndice j). Las ecuaciones de Sw_j , y S_{max} ser resueltas por medio de iteración para obtener valores coincidentes en ambos contenedores (WEAP utiliza el algoritmo predictor-corrector). Si se quisiese realizar una representación de acuíferos de forma separada y se estableciera un elemento para este tipo de

estructura (acuífero aluvial), el segundo término de la ecuación de S_{max} , es ignorado y la recarga R (volumen/paso de tiempo) hacia el acuífero es:

$$R = \sum_{j=1}^N A_j \cdot (1 - f_j) \cdot k_{s,j} \cdot z_{1,j}^2$$

Donde R es la percolación A_j es el área de aporte del elemento j .

2.3.1.5. Parámetros del modelo hidrológico (SMM).

2.3.1.5.1. Sensibilidad esperada de los factores del modelo hidrológico.

En la Guía para Elaboración de Balances Hídricos se detalla la sensibilidad de los parámetros en el modelo hidrológico de WEAP. En la Tabla 2.6 se presenta la sensibilidad de cada parámetro.

Tabla 2.6. Sensibilidad del modelo.

| Parámetro | Amato, McKinney, Ingo-Blanco, y Teasty, 2006, CCGUC-SEI, 2009, Ingo-Blanco, 2009 | González, 2016 | Soria, 2016 |
|--------------|--|----------------|-------------|
| Sw (mm) | Media | Media | Media |
| Dw (mm) | Alta | Media | Alta |
| Kc | Alta | Media | Media |
| RRF | Alta | Media | Media-Baja |
| Ks (mm/mes) | Media | Media | Media |
| Ks2 (mm/mes) | Media | Media | Media |
| f | Media | Media | Baja |
| h1 | Baja | Media | Baja |
| h2 | Baja | Media | Baja |

Fuente: MMAyA y VMRH, 2016.

Conocer la sensibilidad de los datos es muy importante porque nos permite saber cuál va ser la reacción del modelo ante las variaciones de cualquier parámetro, esto en la calibración es vital porque en función a la sensibilidad se hace las modificaciones.

2.3.1.5.2. Coeficiente de cultivo Kc.

Se sugiere considerar coeficientes distintos para las coberturas y para los cultivos. Para coberturas, los valores se obtienen por trabajo de campo o mediante valores referenciales de la literatura. Por otro lado, es factible considerar que el Kc para cobertura vegetal nativa es invariable en el año. Para el caso de los cultivos, los Kc tienen variabilidad mensual (estacional). Su estimación a través de técnicas de teledetección. (MMAyA y VMRH, 2016).

Tabla 2.7. Valores de Kc por unidad de cobertura vegetal y uso de suelo.

| Unidad de cobertura y uso de suelo | Kc | Kc | Kc |
|---|----------------|--------------|------------|
| | Gonzales, 2016 | Espejo, 2016 | SNET, 2005 |
| Bosque denso (amazónico, andino, chiquitano) | 1,05 | - | 1,0 |
| Bosque esclerófilo, bosque denso nublado | - | 0,8 | 1,0 |
| Bosque o monte ralo | 0,9 | - | 1,0 |
| Bosque ralo esclerófilo | - | 0,8 | 1,0 |
| Matorral, pajonal andino montano semiárido | 0,9 | - | - |
| Matorral chiquitano sobre ondulaciones y llanuras, semiárido | 0,9 | - | 0,95 |
| Herbazal graminoide, llanura inundada estacionalmente o por periodos cortos | 1,0 | - | 1,05 |
| Herbazal graminoide, puna altoandina árida | 1 | - | - |

| | | | |
|--|------|------|------|
| Herbazal graminoide, puna altoandina árida | 1 | - | - |
| Herbácea graminoide | - | 0,75 | - |
| Vegetación dispersa en pedregales, puna altoandina semiárida | 0,7 | - | 0,7 |
| Arbustos dispersos | - | 0,75 | 0,7 |
| Estructura urbana y rural, ciudades y pueblos | 0,7 | 0,50 | - |
| Depósitos de arena, playas y dunas | 0,7 | - | - |
| Superficie descubierta cárcavas, arena | - | 0,6 | - |
| Cuerpos y cursos de agua | 1,05 | 0,4 | 1,1 |
| Agricultura múltiple, agricultura comercial | 0,7 | - | - |
| Cultivos plurianuales | - | 0,8 | - |
| Cultivos en rotación extensiva | - | 0,7 | - |
| Cultivos en rotación intensiva | - | 0,85 | - |
| Pastos cultivados y naturales | - | - | 1,0 |
| Zonas quemadas | - | - | 1,0 |
| Sistemas agroforestales | - | - | 0,7 |
| Ríos | - | - | 1,15 |

Fuente: MMAyA y VMRH, 2016.

2.3.1.5.3. Capacidad de almacenamiento de agua en la zona de raíces (Sw).

Este parámetro hace referencia a la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo que en este caso corresponde al primer balde de SM. Este parámetro puede ser determinado en base a mapas temáticos e información fisiográfica disponible. En la literatura y según experiencias anteriores en Bolivia se sugiere estimar en base a la Capacidad de Retención de Humedad (CRH) y la profundidad de raíces en cada Tipo de Utilización de Tierra (TUT). En el caso de CRH en la guía metodología de MDSP (2001) se propone una tabla empírica sistematizada de la literatura (ver tabla 8). Para el uso de esta tabla es necesario contar con datos de textura y pedregosidad del suelo. (MMAyA y VMRH, 2016)

La estructura del modelo WEAP permite que este parámetro caracterice los grupos de suelos dentro de una subcuenca. Típicamente en WEAP, valores de Sw son aplicados combinaciones de cobertura vegetal delineados dentro de cada subcuenca.

Tabla 2.8. Capacidad de retención de humedad (CRH).

| Textura | | Sin piedra ajustado a CRH (mm/mes) | CRH tropical Contenido de piedra y grava (% de reducción sin piedra con CRH tropical) | | | |
|---------|------------------------|------------------------------------|---|------|--------|--------|
| | | | 0% | 0-5% | 15-40% | 40-80% |
| Código | Descripción | | | | | |
| Y | Arcilla | 140 | 130 | 90 | 50 | 10 |
| F | Franco | 170 | 160 | 110 | 40 | 20 |
| L | Limo | 150 | 130 | 100 | 55 | 10 |
| A | Arena Francosa | 90 | 80 | 60 | 30 | 10 |
| AF | Arena Francosa | 110 | 100 | 70 | 40 | 10 |
| YA | Arcilla Arenosa | 110 | 100 | 70 | 40 | 10 |
| FYA | Franco arcillo-arenoso | 150 | 140 | 100 | 55 | 10 |
| FA | Franco arenoso | 150 | 130 | 100 | 55 | 10 |
| YL | Arcilla limosa | 160 | 140 | 110 | 55 | 10 |
| FYL | Franco arcillo limosa | 170 | 150 | 110 | 65 | 20 |
| FL | Franco limoso | 190 | 170 | 130 | 70 | 20 |
| FY | Franco arcilloso | 150 | 130 | 100 | 55 | 10 |

Fuente: MMAyA y VMRH, 2016.

Ahora, la profundidad radicular indica hasta que profundidad las plantas pueden usar el agua que está almacenada en el suelo. El agua disponible a una profundidad mayor a la radicular no está disponible para las plantas, y por tanto no hace parte del balance hídrico del suelo. En la tabla 2.9.

muestran valores referenciales de profundidad máxima de raíces por tipo de utilización de tierra a escala 1:250.000 (MMAyA, 2016).

Tabla 2.9. Profundidad máxima de raíces.

| Tipo de utilización de la tierra | Profundidad máxima de raíces (cm) |
|---|--|
| Agricultura anual | 100 |
| Agricultura perenne | 150 |
| Pastos sembrados | 100 |
| Pastos naturales | 100 |
| Bosques | 150 |

Fuente: ZONISIG, 2001.

La Tabla 2.9 tiene limitaciones para los tipos de utilización de tierra definidos para este estudio de balance hídrico, ya que para este estudio se tiene un número mayor de clases.

La Tabla 2.10 nos proporciona información de la profundidad máxima de raíces. En la aplicación práctica en cada macrocuenca (Altiplano, La Plata y Amazonas) los valores pueden ser ajustados a valores más pequeños dependiendo de las características fisiográficas y con el apoyo de la distribución espacial de las calicatas.

Tabla 2.10. Profundidad máxima de raíces.

| Tipo de utilización del suelo | Profundidad máxima de raíces. (m) | Fuente |
|--|--|---|
| Agricultura (Agriculture) | 1,5 | Con la base de datos de calicatas de suelo del Proyecto ZONISIG |
| Bosque (Forest) | 2 | |
| Herbácea (Grassland) | 1 | |
| Bosque con inundación (Wetland) | 2 | |
| Centros poblados y urbanos (Settlement) | 0,1 | |
| Matorrales (Shrubland) | 1,5 | |
| Vegetación dispersa o aislada de arbustos y gramíneas (Other/Bare) | 1 | |

Fuente: MMAyA, 2016.

2.3.1.5.4. Conductividad en la zona de raíces (Ks).

El parámetro de conductividad en la zona de raíces (Ks) representa el flujo máximo de agua en el suelo cuando está a capacidad de campo. Este parámetro caracteriza la capacidad del suelo para transmitir agua, y tiene como unidad común cm/s.

Tabla 2.11. Valores de Ks para diferentes clases texturales.

| Textura | Promedio (cm/d) | Mínimo (cm/d) | Máximo (cm/d) |
|------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Arena | 727,2 | 403,2 | 1520,64 |
| Arena francosa | 1025,8 | 25,92 | 1897,92 |
| Franco arenoso | 239,04 | 16,56 | 430,56 |
| Franco | 70,56 | 5,04 | 60,48 |
| Franco limoso | 27,36 | 6,48 | 61,92 |
| Franco arcillo arenoso | 64,8 | 23,472 | 118,08 |
| Franco arcilloso | 38,88 | 1,008 | 92,16 |
| Franco arcillo limoso | 18,72 | 1,44 | 28,8 |
| Arcilla arenosa | 30,24 | 7,2 | 61,92 |
| Arcilla limosa | 21,6 | 1,296 | 56,16 |
| Arcilla | 14,4 | 3,456 | 28,8 |

Fuente: MMAyA, 2016.

Dada su relación a un parámetro físico y medible del suelo, el valor de Ks en el método SM del modelo WEAP se puede estimar inicialmente con valores referenciales elaborados en la literatura de fuentes empíricas o experimentales. (MMAyA, 2016).

Es el máximo flujo posible cuando el reservorio "1" está a capacidad de campo. Al referirse en teoría a un parámetro físico, estos valores se estiman a través de referencias generales de la literatura reduciendo de esta manera los parámetros a calibrar, en cuyo caso las unidades del parámetro deberían ser [mm/d o mm/mes]. Tal como ocurre con la estimación de la conductividad de la zona profunda, la conceptualización del autor difiere de la aparente interpretación física sugerida por el nombre del parámetro. (MMAyA y VMRH, 2016)

2.3.1.5.5. Factor de resistencia a la escorrentía (RRF).

Inicialmente el parámetro estaba concebido como Índice de Área Foliar (LAI) (Purkey y otros, 2008, pág. 112). Pero este parámetro tal como su nombre lo indica ahora se refiere más a un factor de resistencia a la escorrentía que está en función de algunas características fisiográficas como la vegetación, pendiente, pedregosidad, etc. El rango de este parámetro varía entre 0,1 hasta 10, cuando los valores están cerca de 10 existe mayor resistencia a la escorrentía, mientras que valores próximos a 0,1 indican menor resistencia. Para el presente estudio, este parámetro se ha definido en función de la utilización de la tierra, y además haciendo consideración indirecta de otras características fisiográficas. En la Tabla 2.12 se presentan algunos criterios fisiográficos usados

para la parametrización del factor de resistencia a la escorrentía (RRF) en cada macro cuenca o cuenca. Los rangos numéricos asociados a estos criterios están presentados en la sección de parametrización específica de cada macro cuenca. Controla la respuesta de la escorrentía superficial. Valores altos implican tasas bajas de escorrentía y viceversa.

Tabla 2.12. Valores de RRF para diferentes lugares (adm).

| Tipo de utilización del suelo | RRF Altiplano | RRF Oriental S. Andino | RRF Montaña | RRF Llanura | RRF (Espejo,2016) |
|--|------------------|------------------------------|----------------|----------------|----------------------|
| Agricultura (Agriculture) | 6 | 5 | 4 | 5 | 4 |
| Bosque (Forest) | 8 | 6 | 6 | 9 | 5 |
| Herbácea (Grassland) | 6 | 4 | 4 | 6 | 4,5 |
| Centros poblados y urbanos | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Matorrales (Shrubland) | 6 | 5 | 5 | 7 | 4,5 |
| Vegetación dispersa o aislada de arbustos y gramíneas (Other/Bare) | 5 | 3 | 3 | 3 | - |

Fuente: MMAyA y VMRH, 2016.

Valores estimados en base a calibración del modelo varían en el rango de 0,1 a 10. El RRF se lo relaciona teóricamente con el LAI (Purkey y otros, 2008), a su vez estimado a partir de técnicas de teledetección o a partir de referencias en la literatura. La tabla 2.13 provee los valores estimados. (MMAyA, VMRH, 2016).

Tabla 2.13. Índice de área foliar (LAI) para distintos tipos de cobertura (adm).

| Cobertura | LAI | | |
|---|----------|--------|--------|
| | Promedio | Mínimo | Máximo |
| Desiertos (sin cobertura vegetal) | 1,31 | 0,59 | 2,84 |
| Pastura (zonas templadas y tropicales) | 1,71 | 0,29 | 5 |
| Pastizales altos, arbustos | 2,08 | | |
| Otra vegetación | 2,08 | | |
| Pastizales para la actividad ganadera | 2,5 | | |
| Pastizales | 2,5 | | |
| Cultivos (zonas templadas y tropicales) | 3,62 | 0,2 | 8,7 |
| Cultivos (agricultura intensiva, extensiva) | 4,22 | | |
| Humedales | 6,34 | 2,5 | 8,4 |
| Áreas urbanas | 8 | | |
| Plantación forestal | 8,72 | 1,55 | 18 |

Fuente: MMAyA y VMRH, 2016.

2.3.1.5.6. Dirección preferencial del flujo (f).

El parámetro de dirección de flujo preferente se utiliza para la partición de flujo de la zona de raíz al estrato inferior de la capa de suelo o aguas subterráneas. Puede variar según la clasificación de cobertura vegetal y su rango es de 0 a 1, donde 1 indica que la dirección de flujo horizontal es el 100% y 0 indica que la dirección de flujo vertical es 100%. En las cuencas donde existe predominancia de depósitos cuaternarios los valores de “f” están en el rango de 0,25 y 0,45; mientras que en cuencas con relieve complejo el valor está en 0,6. (MMAyA, 2016).

Tabla 2.14. Estimaciones de f para diferentes clases de cobertura vegetal (adm).

| Unidad de cobertura y uso de suelo | f (Espejo,2016) | f (González,2016) | f (Soria, 2016) |
|--|-----------------|-------------------|-----------------|
| Bosque denso y ralo | 0,55 | 0,15 | - |
| Bosque denso andino montano | - | 0,90 | - |
| Matorral,pajonal andino montano semiárido | - | 0,90 | - |
| Matorral chiquitano sobre ondulaciones y llanuras | - | 0,15 | - |
| Herbazal graminoide, llanura inundadaestacionalmente o por periodos cortos | - | 0,15 | - |
| Herbazal graminoide, puna altoandida árida | - | 0,90 | - |
| Herbácea graminoide | 0,65 | | - |
| Vegetación dispersa en pedregales, puna altoandina semiárida | | 0,90 | - |
| Arbustos dispersos | 0,65 | | - |
| Arbustos con pajonal | - | - | 0,15(<3000msnm) |
| | | | 0,50(>3000msnm) |
| Cultivos | 0,65 | 0,50 | 0,50 |
| Estructura urbana y rural ciudades y pueblos | 0,90 | 0,90 | - |
| Cuerpos y cursos de agua | 0,50 | 0,50 | - |

Fuente: MMAyA y VMRH, 2016.

2.3.1.5.7. Conductividad en la zona profunda (Kd).

El parámetro de conductividad profunda representa la tasa de conductividad para el segundo cubo, en milímetros por día. Controla la transmisión de caudal base y WEAP aplica un solo valor de Kd para todo el catchment.

Es un valor único para toda la cuenca y no se considera cuando el nodo de demanda recarga el acuífero local. Controla el flujo subterráneo a través de una relación directamente proporcional.

Una posibilidad para estimar valores iniciales es a través de la geología local. (MMAyA, VMRH, & Soria,2016).

2.3.1.5.8. Capacidad de almacenamiento de agua en la zona profunda Dw (mm).

Se estima como un valor único para toda la cuenca, asumiendo un solo reservorio horizontal subterráneo. El valor se ignora cuando el sitio de la demanda recarga el acuífero local (SEI, 2015). Se infiere por calibración del modelo, debido a que su estimación es compleja a través de información física (Purkey y otros, 2008). La capacidad de agua profunda es la capacidad de almacenamiento efectivo de agua, en milímetros, del estrato más profundo de la capa de suelo, o del segundo cubo del método de humedad del suelo.

Tabla 2.15. Parámetros de uso de cobertura de suelos balde superior.

| Variable | Descripción WEAP |
|---|---|
| Kc: Coeficiente de cultivo [-]. | Coeficiente del cultivo, en relación al cultivo de referencia. |
| Sw: Capacidad de almacenamiento de agua en zona de raíces [mm]. | Capacidad efectiva de retención del agua de la capa superior del suelo (Parte superior "Balde") |
| Ks: Conductividad de la zona de raíces [mm/mes]. | Zona Radicular ("Recipiente" superior) tasa de conductividad hidráulica a saturación plena (cuando el almacenamiento relativo $z1=1.0$), que será fraccionado de acuerdo a dirección preferida de flujo, entre interflujo y flujo hacia capas inferiores del suelo. |
| RRF: Factor de resistencia a la escorrentía [-]. | Usado para controlar la respuesta de la escorrentía superficial, relacionado a factores como índice de área foliar y pendiente de suelo. La escorrentía tenderá a decrecer con los valores más altos del Factor de Resistencia a la Escorrentía (RRF) (Rango 0,1 a 10). |
| f: Dirección preferencial del flujo [-]. | Dirección del flujo preferencial 1=100% flujo horizontal, 0=100% flujo vertical. Usado para la partición del caudal de salida de la capa de la zona de raíces (Superior "Balde") entre el interflujo y caudal de la capa más baja del suelo (Inferior "Balde"). |
| Z1: Nivel de humedad en la zona de raíces [%]. | El valor inicial Z1 al inicio de la simulación. Es el almacenaje relativo dado como porcentaje del almacenamiento total efectivo de la capacidad de agua en la zona de raíz. |

Fuente: Elaboración propia, con apoyo bibliografía.

En las tablas 2.15 y 2.16 se muestra un resumen de todos los parámetros del modelo. La capacidad de almacenamiento en la zona profunda es un parámetro que se debe calibrar y se encuentra en la

parte inferior del balde, es decir este parámetro no se lo puede estimar o aproximar mediante características físicas de la cuenca.

Tabla 2.16. Parámetros de uso de cobertura de suelos balde inferior.

| Variable | Descripción WEAP |
|---|---|
| Kd: Conductividad profunda [mm/mes]. | Tasa de Conductividad (Longitud/Tiempo) de la capa profunda (fondo "Balde") a saturación total (cuando el almacenamiento relativo $z_2=1$), el cual controla la transmisión del flujo base. El flujo base incrementa a medida que este parámetro aumenta. |
| Dw: Capacidad agua profunda [mm]. | Profundidad de la capa inferior del suelo (fondo "Balde"). Este valor es ignorado si el sitio de demanda tiene un escurrimiento/infiltración en conexión a un nodo de aguas subterráneas. |
| Z2: Nivel de humedad en la zona profunda [%]. | El valor inicial Z2 al inicio de la simulación. Es el almacenaje relativo dado como porcentaje del almacenamiento total efectivo de la capacidad de agua profunda. Este parámetro es ignorado si el sitio de la demanda tiene un vínculo de escurrimiento/infiltración al nudo de agua subterránea. Esta tasa no puede variar entre los tipos de uso. |

Fuente: Elaboración propia, con apoyo bibliografía.

Los parámetros del balde inferior en WEAP se lo aplica a todo el catchment por lo que no puede ser caracterizado por el área de suelo o cobertura vegetal. La zona profunda además de tener una capacidad de almacenamiento (Dw), tiene una conductividad que gobierna el flujo base.

El modelo hidrológico tiene 9 parámetros que influyen en cada uno de los procesos del ciclo del agua, conceptualmente lo que hace el modelo hidrológico es convertir las entradas de precipitación en flujos de salidas que alimentan los ríos.

Es importante tener en cuenta que a cada combinación suelo-cobertura en cada subcuenca le corresponde un tanque 1 mientras que para la zona profunda hay un tanque 2 para toda la subcuenca.

Por otro lado, como en todo modelo es necesario fijar las fronteras o condiciones iniciales, en ese sentido debemos fijar el nivel de humedad inicial en la zona de raíces (Z1) y el nivel de humedad en la zona profunda (Z2).

Las ecuaciones del modelo representan un balance de agua entre entradas y salidas, en donde la diferencia entre la entrada y salidas en cada uno de los tanques, representan los cambios en la humedad del tanque 1 y el tanque 2 en la zona de raíces y en la zona profunda respectivamente.

2.3.1.5.9. Valores referenciales considerados en la literatura.

La literatura reporta aplicaciones del modelo hidrológico en distintos ambientes geográfico-climáticos. La síntesis presentada en las tablas siguientes compara los criterios para la selección de valores representativos para cada parámetro; las dos últimas referencias difieren en sus percepciones respecto a los coeficientes de conductividad hidráulica por razones explicadas en los dos subtítulos precedentes. (MMAyA y VMRH, 2016).

Tabla 2.17. Parámetros del modelo de humedad en el suelo.

| Parámetro | Área (km ²) | | Dw(mm) | | ks ₂ [LT ⁻¹] | |
|--|-------------------------|-----|--------|-------|-------------------------------------|-----------------|
| | Máx | Min | Máx | Min | Máx | Min |
| Amato McKinney, Ingol-Blanco y Teasley, 2006 | 18000 | 106 | 25 | 1 | 1080 mm/d | 96 mm/d |
| CCGUC-SEI,2009 | 11600 | 512 | 7500 | 300 | 600 mm/mes 250mm/ semana | 140 mm/mes |
| Ingol-Blanco,2009 | 18000 | 106 | 300000 | 12000 | 45 mm/mes | 3 mm/mes |
| SEI,2015B | 22171 | | 1200 | | 500 mm/mes | |
| SEI,2014 | 2880 | | 800 | | 80 mm/mes | |
| Escobar, Purkey, Pouget, Suarez, Condom y Ramos,2008 | 11634 | | 1000 | | 600 mm/mes | |
| Espejo A., 2016 | 1900 | 33 | 500 | | 200 mm/mes | |
| González,2016 | 11500 | 500 | 300 | | 20 mm/mes | |
| Soria,2016 | 270 | 60 | 320 | 70 | 816 mm/d/mes | 492 mm/d/mes |

Fuente: MMAyA y VMRH, 2016.

Tabla 2.18. Parámetros del modelo de humedad en el suelo.

| Parámetro | | h ₁ (%) | | h ₂ (%) | | Sw(mm) | | Kc | | RRF | | Ks [LT ⁻¹] | | f | | | |
|--|-------------|--------------------|-----|--------------------|-----|--------|-----|------|------|------|------|------------------------|-----|-------------|------|------|------|
| | | Máx | Min | Máx | Min | Máx | Min | Máx | Min | Máx | Min | Máx | Min | Máx | Min | | |
| (Amato McKinney, Ingol-Blanco y Teasley, 2006) | | 50 | | 50 | | 25 | 5 | 1 | 0,34 | 8 | 0,10 | 624 mm/d | | 7 mm/d | | - | |
| (CCGUC-SEI,2009) | 4 mm/semana | - | | - | | 4320 | 80 | - | | 250 | 0,80 | 500 mm/mes | | 1 | 0,20 | | |
| (Ingol-Blanco,2009) | | 30 | 5 | 20 | 5 | 600 | 250 | - | | - | | 180 mm/mes | | 45 mm/mes | | 0,20 | |
| (SEI,2015B) | | 20 | 10 | 40 | 30 | 1300 | 600 | 1,00 | 0,60 | 4,0 | 0,50 | 1050 mm/mes | | 80 mm/mes | | 0,90 | 0,40 |
| (SEI,2014) | | 30 | | 30 | | 800 | 400 | 1,1 | 0,75 | 6,50 | 3 | 190 mm/mes | | 80 mm/mes | | 0,80 | 0,30 |
| (Escobar, Purkey, Pouget, Suarez, Condom y Ramos,2008) | | 35 | | 35 | | 713 | | 1,10 | | 3,20 | 1,60 | 600 mm/mes | | | | 0,68 | |
| (Espejo A., 2016) | | 80 | | 15 | | 155 | 210 | 0,85 | 0,40 | 6 | 3 | 80 mm/mes | | 40 mm/mes | | 0,90 | 0,55 |
| (González,2016) | | - | | - | | 1800 | 100 | 1,05 | 0,70 | 7 | 1 | 50 mm/mes | | 20 mm/mes | | 0,90 | 0,15 |
| (Soria,2016) | mes | 30 | | 30 | | 180 | 31 | 1,05 | 0,50 | 4,20 | 1,30 | 10239mm/d/mes | | 141mm/d/mes | | 0,50 | 0,15 |

Fuente: MMAyA y VMRH, 2016.

Tabla 2.19. Parámetros del modelo de humedad en el suelo.

| Cobertura | Sw (mm) | | | RRF | | | f | | |
|---|-------------|---------------|------------|-------------|---------------|------------|-------------|---------------|----------------------------------|
| | Espejo 2016 | González 2016 | Soria 2016 | Espejo 2016 | González 2016 | Soria 2016 | Espejo 2016 | González 2016 | Soria 2016 |
| Bosque denso | 200 | 1800 | | 5 | 3,30 | | 0,55 | 0,15 | |
| Bosque denso andino montano semiárido | | 350 | | | 1,90 | | | 0,90 | |
| Bosque ralo suculentas | 200 | 350 | | 5 | 1,90 | | 0,55 | | |
| Bosque ralo esclerófilo | 190 | 350 | | 5 | 1,90 | | 0,55 | | |
| Bosque o monte ralo | | 350 | | | 1,90 | | | 0,90 | |
| Matorral,pajonal andino montano semiárido | | 350 | | | 1,90 | | | 0,90 | |
| Matorral chiquitano sobre ondulaciones y llanuras | | 1800 | | | 3,30 | | | 0,15 | |
| Herbazal graminoide, llanura inundada estacionalmente por periodos cortos | | 1800 | | | 3,30 | | | 0,15 | |
| Herbazal graminoide, puna altoandina árida | | 350 | | | 1,90 | | | 0,90 | |
| Herbácea graminoide | 155 | 350 | | 4,5 | 1,90 | | 0,65 | | |
| Gramadal camefital | | | 90 | | | 2,50 | | | 0,15(<300msnm) 0,5(>3000msnm) |
| Vegetación dispersa en pedregales puna altoandina semiárida | | 350 | | | 1,90 | | | 0,90 | |
| Arbustos dispersos | 150 | | | 4,5 | | | 0,65 | | |

| Continuación Tabla 2.19 | | | | | | | | | |
|---|-----|------|-----|---|---|------|------|------|----------------------------------|
| Arbustos con pajonal | | | 90 | | | 2,10 | | | 0,15(<300msnm) 0,5(>3000msnm) |
| Arbustos con pajonal/pastos | | | 140 | | | 2,10 | | | 0,15(<300msnm) 0,5(>3000msnm) |
| Pajonal | | | 130 | | | 2,50 | | | 0,15(<300msnm) 0,5(>3000msnm) |
| Tholar | | | 180 | | | 2,10 | | | 0,15(<300msnm) 0,5(>3000msnm) |
| Cultivos | 210 | 800 | 150 | 4 | 4 | 4,20 | 0,65 | 0,50 | 0,50 |
| Estructura urbana y rural, ciudades y pueblos | 150 | 100 | | 2 | 1 | | 0,90 | 0,90 | |
| Cuerpos de agua | 180 | 1000 | | 6 | 7 | | 0,50 | 0,50 | 0,50 |
| Superficie descubierta cárcavas | 180 | | | 3 | | | 0,85 | | |
| Superficie descubierta arenas | 170 | 1000 | | 3 | 2 | | 0,85 | 0,50 | |
| Superficie descubierta, suelos muy poco profundos y afloramientos rocosos | | | 28 | | | 1,30 | | | |

Fuente: MMAyA y VMRH, 2016.

2.3.1.6. Calibración del Modelo.

En la etapa de calibración del modelo se busca lograr un set de parámetros hidrológicos y operaciones que permitan obtener una representación de caudales y de operación de obras de infraestructura que asemeje los datos históricos de la forma más cercana posible. Para esto, es necesario realizar comparaciones entre series de datos de caudales en puntos específicos de la cuenca observadas versus simuladas, así como comparar los datos de niveles de reservorios

observados versus simulados, así como otras variables que representen la operación de los recursos hídricos en una cuenca. Con base en estas comparaciones se realizan medidas estadísticas para estimar la precisión del modelo y de esta manera ajustar los parámetros hasta lograr la mejor respuesta de dichas medidas estadísticas. A continuación, se presentan aspectos metodológicos y prácticos de la etapa de calibración del modelo.

2.3.1.6.1. Aspectos Metodológicos de la Calibración del Modelo.

El proceso de calibración del modelo desarrollado de acuerdo al análisis de oferta y demanda de agua descrito con anterioridad se realiza en tres etapas consecutivas. Estas etapas permiten revisar el comportamiento del modelo primero en las cuencas aportantes que corresponden a zonas de régimen natural, luego en las cuencas intermedias y finalmente en las cuencas bajas. (Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile, Stockholm Environment Institute, 2009, pág. 62)

2.3.1.6.2. Calibración de cuencas aportantes o en zonas de régimen natural.

Una primera etapa consiste en una calibración hidrológica de las subcuencas aportantes.

Se espera que la influencia humana en estas subcuencas sea baja y por lo tanto los caudales no son afectados por el uso o manejo del recurso.

De suma importancia en esta etapa del proceso de calibración es el análisis de las características hidrológicas particulares asociadas a los ecosistemas que sean relevantes en la cuenca en estudio.

En una primera aproximación es una buena práctica establecer factores de calibración generales para toda el área mencionada, los cuales modifican los parámetros de uso de suelo incluyendo, principalmente:

- Kc: coeficiente de cultivo.
- Sw: Capacidad de almacenamiento de agua en la zona de raíces.
- Dw: Capacidad de almacenamiento de agua en la zona profunda.
- RRF: Factor de resistencia a la escorrentía.
- Ks: Conductividad de zona de raíces.
- Kd: Conductividad de zona profunda.
- f: Dirección preferencial de flujo.

Generalmente se busca ajustar caudales pico y caudales base, por ejemplo, si se busca aumentar la respuesta de caudales pico, se debe ajustar la escorrentía superficial la cual es directamente

afectada por el RRF y K_s , los cuales afectan la reactividad de los catchments. Por otro lado, si se quiere afectar los caudales base se debe ajustar f y K_d . Nótese que la relación entre los diferentes términos de la ecuación es no-lineal y por lo tanto al afectar un término, se afectan los otros de forma indirecta. Por ejemplo, otro factor de calibración como la conductividad hidráulica de la zona profunda, K_d , puede ser incrementado, aumentando la conductividad, y por tanto la descarga de los perfiles profundos, y el consecuente aumento en los caudales base. Por otro lado, si se aumenta la capacidad hídrica del perfil superior, Sw , se logra un mayor flujo sub-superficial, y por tanto un aumento de los caudales máximos. Finalmente, para el parámetro de capacidad de retención de humedad en el perfil profundo (Dw), regula la transmisión de los flujos a los caudales base. (Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile, Stockholm Environment Institute, 2009, pág. 69)

2.3.1.6.3. Calibración de cuencas intermedias

La metodología de calibración considerada tanto en la zona media y baja de la cuenca corresponde a una calibración subcuenca por subcuenca, similar al procedimiento de calibración de cuencas aportantes. En la figura 2.5 se presenta un ejemplo de estaciones hidrométricas localizadas en cuencas intermedias donde existen datos observados en la cuenca. Al igual que en la zona alta, se obtiene la distribución mensual calibrada para todas las estaciones, así como también la relación entre los caudales modelados y observados utilizando las estadísticas para cada una de las estaciones consideradas y para todo el periodo de modelación.

En el proceso de calibración de las cuencas intermedias y bajas se deben considerar la demanda de agua de los diferentes usuarios en estas secciones de la cuenca. Por ejemplo, si se tiene información con respecto a la descarga de agua de fuentes superficiales para ciudades y para riego se debe comparar con los valores simulados por el modelo. Si estos no son comparables se deben ajustar los parámetros que condicionan estas acciones. En el caso de la demanda de riego hay que modificar los umbrales de riego que determinan las necesidades de riego en un catchment y cultivo determinado.

En el caso de la demanda de ciudades se deben contemplar los parámetros que corresponden a las tasas de demanda per cápita y factores de pérdidas y reutilización del agua al interior de las ciudades. Una vez completada la etapa de calibración hidrológica se procede a calibrar la operación de los embalses y otras obras de infraestructura que se encuentren en la cuenca. En algunos casos

los embalses se encuentran ubicados en la zona de cierre de las cuencas lo que permite que se realice la calibración hidrológica y operacional de manera independiente.

Si es que la ubicación de un embalse u obra de infraestructura relevante se encontrara en un punto superior al punto de cierre de la cuenca se debe realizar la calibración operacional de manera asociada a la calibración hidrológica.



Figura 2.5. Estaciones de aforo para calibración (Zona Media).

Fuente: Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile, Stockholm Environment Institute.

2.3.1.6.4. Medidas de bondad de ajuste.

La calibración de modelos usualmente se enfoca en un “criterio de exactitud”, el cual se apoya en la cuantificación de la bondad de ajuste del modelo. Para este fin, se hace uso de diferentes “medidas de bondad de ajuste”, entre las cuales podemos mencionar:

- **Coefficiente de Nash – Sutcliffe (NSE).**

El criterio de Nash–Sutcliffe es uno de los más usados en hidrología. Esta medida propuesta por Nash y Sutcliffe (1970), busca establecer la eficiencia del modelo para predecir los caudales en comparación con la utilización de la media como predictor de la variable. Un coeficiente de $NSE = 0$ implica que el modelo pronostica los caudales de igual forma a

como lo haría la media de los datos observados, un NSE negativo implica que la media es mejor predictor y un NSE mayor a 0 implica que el modelo es mejor predictor que la media.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - Q_{o,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - \bar{Q}_o)^2}$$

| Variable | Descripción |
|-------------|---|
| NSE | Coficiente Nash-Sutcliffe |
| $Q_{s,i}$ | Caudal simulado en el paso de tiempo i |
| $Q_{o,i}$ | Caudal observado en el paso de tiempo i |
| \bar{Q}_o | Promedio de los caudales observados |
| n, i | Número total de pasos de tiempo |

Mide cuánto de la variabilidad de las observaciones es explicada por la simulación. Si la simulación es perfecta, NSE=1; si se intentase ajustar las observaciones con el valor promedio, entonces NSE=0. Algunos valores sugeridos para la toma de decisiones son resumidos en la tabla 2.20.

Tabla 2.20. Valores referenciales del criterio de Nash – Sutcliffe.

| NSE | Ajuste |
|-------------|---------------|
| < 0,20 | Insuficiente |
| 0,20 a 0,40 | Satisfactorio |
| 0,40 a 0,60 | Bueno |
| 0,60 a 0,80 | Muy bueno |
| < 0,80 | Excelente |

Fuente: Molnar, P., 2011.

Cuando los valores de la variable simulada son demasiado grandes, se suele utilizar la “eficiencia logarítmica de Nash-Sutcliffe”

$$NSE_{log} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\log Q_{s,i} - \log Q_{o,i})^2}{\sum_{i=1}^n (\log Q_{o,i} - \log \bar{Q}_o)^2}$$

- **Coficiente de BIAS.**

El “BIAS” o sesgo estadístico es la diferencia entre el promedio de los valores medidos y los valores estimados. Sirve para evaluar la existencia de errores sistemáticos de sub o sobreestimación de la variable modelada.

La tendencia de los datos simulados debe ser mayores o menores a los datos observados, El sesgo porcentual de BIAS debe estar entre el $\pm 25\%$.

$$\text{Bias} = \frac{\overline{Q_s} - \overline{Q_o}}{\overline{Q_o}} \cdot 100$$

| Variable | Descripción |
|------------------|-------------------------------------|
| <i>Bias</i> | Coefficiente de BIAS |
| $\overline{Q_s}$ | Promedio de los caudales simulados |
| $\overline{Q_o}$ | Promedio de los caudales observados |

- **Bias:** entre menor el porcentaje de *Bias*, mejor la correspondencia entre los datos observados y simulados. Un *Bias* positivo indica sobre estimación y un *Bias* negativo indica sub-estimación de caudales.

2.3.1.7. Uso del modelo, creación de escenarios.

Una vez que se cuente con el modelo para la cuenca completamente calibrado se pueden realizar una serie de estudios específicos. Una clase de estos estudios corresponde a la evaluación de diferentes escenarios potenciales futuros. Los escenarios futuros pueden ser de diferentes tipos:

- Escenarios de crecimiento o cambio en la población.
- Escenarios de uso de suelo.
- Escenarios de clima.

2.3.1.7.1. Escenarios de crecimiento o cambio en la población.

En general, los escenarios de crecimiento o cambio de población pueden diseñarse considerando las tasas de crecimiento de población proyectadas hacia futuro, así como el cambio en la proporción de población rural y urbana, o el aumento de población dada por un evento específico dentro del modelo como la construcción de una represa.

2.3.1.7.2. Escenarios de uso de suelo.

Los escenarios de uso de suelo pueden considerar aspectos de cambio en la cobertura vegetal dada por tendencias futuras como por ejemplo disminución o aumento de zonas forestales, o cambio en tipos de cultivos por tendencias económicas. Todas estas consideraciones deben estudiarse de forma que al implementar el escenario se sepa con claridad que variables y funciones se van a tener en cuenta al definir el escenario.

2.3.1.7.3. Escenarios de clima.

Los escenarios de clima constituyen uno de los aspectos de mayor uso en un modelo agregado como WEAP. Existen diferentes maneras de implementar proyecciones climáticas dentro de un modelo, incluyendo:

- Incorporación de deltas de temperatura y/o precipitación con base en proyecciones de modelos climáticos: en este caso, se ha realizado un estudio preliminar para determinar el valor de los deltas a aplicar.

Este estudio puede realizarse a partir de la literatura disponible sobre posibles cambios climáticos en la región, o a partir de un procedimiento de análisis de los datos disponibles en bases de datos. Al final de este análisis, se utilizan los deltas para afectar los valores climáticos y se corre el modelo para observar los efectos en la hidrología.

- Uso de datos escalados a la región: si se tiene capacidad técnica, se pueden utilizar los modelos de circulación global para realizar un cambio de escala de forma que se obtengan datos de clima futuro a la escala de la cuenca y con resolución suficiente de forma que se pueda obtener datos climáticos de entrada de precipitación y temperatura al nivel de cada catchment.

2.4. MARCO METODOLÓGICO.

2.4.1. Proceso de aplicación del Modelo.

El desarrollo de un modelo WEAP incluye generalmente las siguientes etapas:

2.4.1.1. Definición del estudio.

En esta etapa se establece el marco temporal, los límites espaciales, los componentes del sistema y la configuración del problema.

2.4.1.2. Búsqueda y análisis de información.

En esta etapa se hace una recolección de datos de acuerdo con el tipo de estudio definido. Esta etapa puede ser iterativa, y generalmente se realiza en dos partes: una etapa de recolección de datos generales, y una etapa de recolección de datos específicos una vez se ha montado el modelo y se han identificado necesidades adicionales de información.

2.4.1.3. Desarrollo del modelo.

En esta etapa se construye el esquema, se realiza la entrada de datos y se realizan corridas iniciales de modelo para observar su comportamiento preliminar y para eliminar posibles inconsistencias y errores.

2.4.1.4. Calibración.

Aquí se desarrolla una caracterización de la oferta y demanda actual del agua, las cargas de contaminantes, los recursos y las fuentes para el sistema.

2.4.1.5. Uso del modelo, generación de escenarios.

Una vez que el modelo está calibrado, se pueden explorar los impactos que tendría una serie de supuestos alternativos sobre las políticas futuras, costos, y clima, por ejemplo, en la demanda de agua, oferta de agua, hidrología y contaminación. (Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile, Stockholm Environment Institute, 2009).

CAPÍTULO III: APLICACIÓN PRÁCTICA

3. DESARROLLO DEL MODELO.

3.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL ÁREA DE ESTUDIO.

3.1.1. Ubicación y superficie de cuenca en estudio.

La cuenca La Victoria en Tarija, Bolivia, es un área de estudio que abarca aproximadamente 60,5 km². Esta cuenca se encuentra en la parte oriental de la Cordillera de Sama, en el departamento de Tarija, al sur de Bolivia. Es una región caracterizada por su clima semiárido y su topografía montañosa. Sus coordenadas UTM aproximadas son:

| Este | Norte | Altitud (m.s.n.m.) |
|---------------|----------------|--------------------|
| 302030.73 m E | 7612171.76 m S | 4272 |
| 308791.00 m E | 7616241.00 m S | 2825 |
| 317567.72 m E | 7621274.89 m S | 1957 |

Fuente: Google Earth.

La cuenca La Victoria es de gran importancia para la región, ya que abastece de agua a varias localidades cercanas, incluyendo la ciudad de Tarija. La cuenca también es utilizada para actividades agrícolas y ganaderas, y su biodiversidad es rica en especies endémicas y en peligro de extinción.

El análisis hidrológico de la cuenca La Victoria es importante para la gestión de los recursos hídricos en la zona, especialmente en la época de sequía, cuando la disponibilidad de agua puede ser limitada. Además, la cuenca se encuentra en una zona propensa a desastres naturales, como inundaciones y deslizamientos de tierra, lo que hace que el análisis de riesgos sea esencial para la toma de decisiones en la planificación territorial y la gestión del territorio.

En resumen, la cuenca La Victoria en Tarija es un área de estudio importante para entender y gestionar los recursos naturales y los riesgos asociados en la región. En la figura 3.1. se muestra la ubicación de la cuenca La Victoria.

3.1.2. Características generales de la cuenca La Victoria.

La cuenca La Victoria, presenta una serie de características generales que la hacen única y de gran importancia para la región. Algunas de estas características son:

Clima: La región presenta un clima semiárido, con lluvias concentradas en los meses de verano y una estación seca prolongada. La precipitación media anual en la cuenca es de alrededor de 500 mm.

Hidrografía: La cuenca La Victoria es drenada por varios ríos y arroyos, siendo el río La Victoria el principal de la cuenca. El río tiene una longitud de aproximadamente 30 km y una cuenca hidrográfica de alrededor de 60,5 km².

Uso del suelo: La cuenca La Victoria es utilizada para actividades agrícolas y ganaderas, y cuenta con una importante superficie de bosques nativos y áreas protegidas.

Conocer los aspectos físicos de la cuenca, nos ayudará a tener una mejor calibración en el modelo, ya que el escurrimiento superficial se ve afectado por la variación de la geología, el uso de suelos, su cobertura vegetal y su fisiografía. La zona de la cuenca La Victoria, se halla entre una altitud de 1.957 y 4272 msnm. En ella se presenta varias formaciones montañosas.

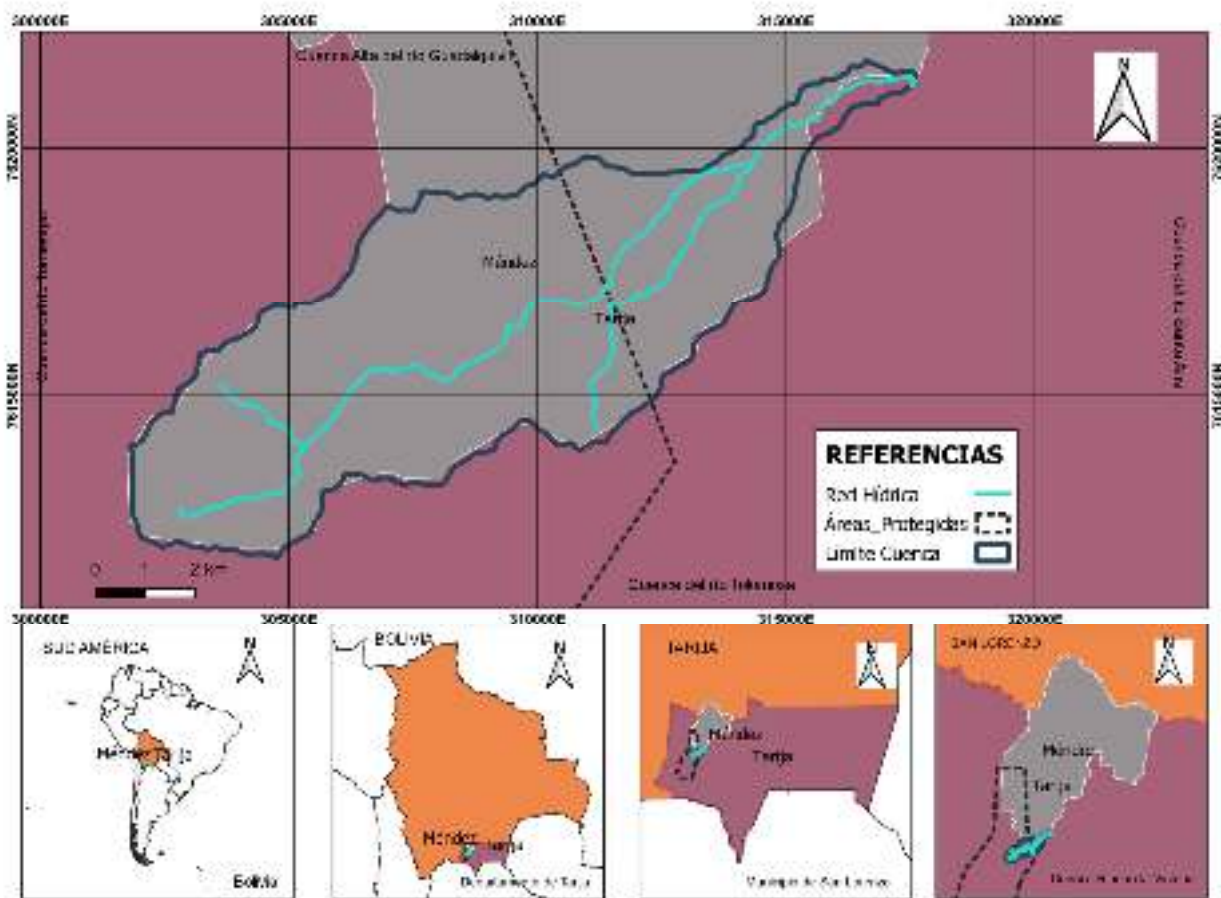


Figura 3.1. Ubicación de la cuenca La Victoria.

Fuente: Elaboración propia, con ayuda Software Qgis.

3.2. ETAPAS PRELIMINARES

3.2.2. Selección escalas y periodos de estudio

3.2.2.1. Escala temporal

De acuerdo con el objetivo de estudio y a la disponibilidad de información la modelación se realizará en un paso de tiempo mensual.

3.2.2.2. Escala espacial

Considerando que la cuenca La Victoria se encuentra en una zona montañosa en donde las diferencias de relieve son importantes y por otro lado siguiendo con las recomendaciones de la Guía Metodológica para Elaboración de Balances Hídricos Superficiales se trabaja en una escala espacial de 90x90 metros que es coherente con la información disponible.

Es importante aclarar que el modelo WEAP para la modelación de cuencas hidrográficas trabaja con dos tipos de resoluciones espaciales 3s (90m) y 15s (450m).

3.2.2.3. Periodos de estudio

Para analizar la influencia del incendio forestal ocurrido el año 2017 se definieron los siguientes periodos de estudio:

Tabla 3.1. Período de estudio

| Descripción | Período |
|--|---------------------|
| Periodo Previo al incendio | Ene 2015 – Jul 2017 |
| El incendio ocurrido en la Cordillera de Sama se inició en la comunidad de Erquiz Ceibal el día 09 de agosto de 2017 y fue controlado en su totalidad el domingo 13 de agosto de 2017. | |
| Incendio | Ago 2017 – Sep 2017 |
| Periodo Post-incendio | Sep 2017 – Dic 2020 |

| | |
|-------------|---------------------|
| Calibración | Mar 2018 – Feb 2019 |
| Validación | Mar 2019 – Feb 2020 |

Fuente: Elaboración propia.

3.3. RECOPIACION INFORMACION PARA EL MODELO.

WEAP requiere la entrada de datos climatológicos (Precipitación, temperatura, humedad relativa, velocidad de tiempo y radiación solar) y características fisiográficas de la cuenca (Cobertura vegetal, tipo de suelo, geología, etc.) para poder estimar los componentes del balance hídrico, además para el proceso de calibración es necesario contar con información hidrométricas.

En la tabla 3.2. se muestra la prioridad y el formato preferido de los datos que requieren para construir un Modelo en WEAP.

Tabla 3.2. Resumen de Datos Requeridos.

| Datos requeridos para alimentar el modelo y durante el proceso de calibración | Prioridad | Formato preferido |
|---|-----------|--------------------------|
| Datos de Entrada-Demandas | | |
| Uso de suelo | | |
| DEM (Modelo de Elevación Digital) | 1 | GIS |
| Cobertura de Vegetación | 1 | GIS |
| Tipo de Suelo | 2 | GIS |
| Geología | 2 | GIS |
| Áreas de agricultura irrigada | 1 | GIS, Excel, texto o csv |
| Tecnología de irrigación | 2 | GIS, Excel, texto o csv |
| Clima | | |
| Precipitación | 1 | Excel, texto o csv |
| Temperatura | 1 | Excel, texto o csv |
| Humedad Relativa | 1 | Excel, texto o csv |
| Viento | 1 | Excel, texto o csv |
| Cobertura de nubes | 2 | Excel, texto o csv |
| Latitud | 1 | Excel, texto o csv |
| Sitios de demanda | | |
| Números de usuarios | 1 | No hay formato preferido |
| Consumo per cápita | 1 | No hay formato preferido |
| Variación Mensual | 1 | No hay formato preferido |

| | | |
|---|---|--------------------------|
| Porcentaje de retorno | 1 | No hay formato preferido |
| Datos para Calibración del Modelo | | |
| Ríos | | |
| Serie de tiempo de caudales | 1 | Excel, texto o csv |
| Nieve | | |
| Serie de tiempo de profundidad de nieve | 2 | Excel, texto o csv |
| Estimados de volumen de nieve | 2 | Excel, texto o csv |
| Glaciares | | |
| Área de cobertura de glaciares | 2 | GIS o Excel |
| Escorrentía de agua desde glaciares | 2 | Excel, texto o csv |

Fuente: Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile, Stockholm Environment Institute, 2009.

3.3.1. Cobertura vegetal, uso y tipo de suelo.

Para la cobertura vegetal se empleó el mapa de vegetación del estudio de PROMETA el 2002 para las cuencas de Tolomosa y la Victoria, mismo que identifica tipos de cobertura vegetal nativa que fueron parte del análisis. En cuanto a la codificación de la cobertura véase en Anexo 5.

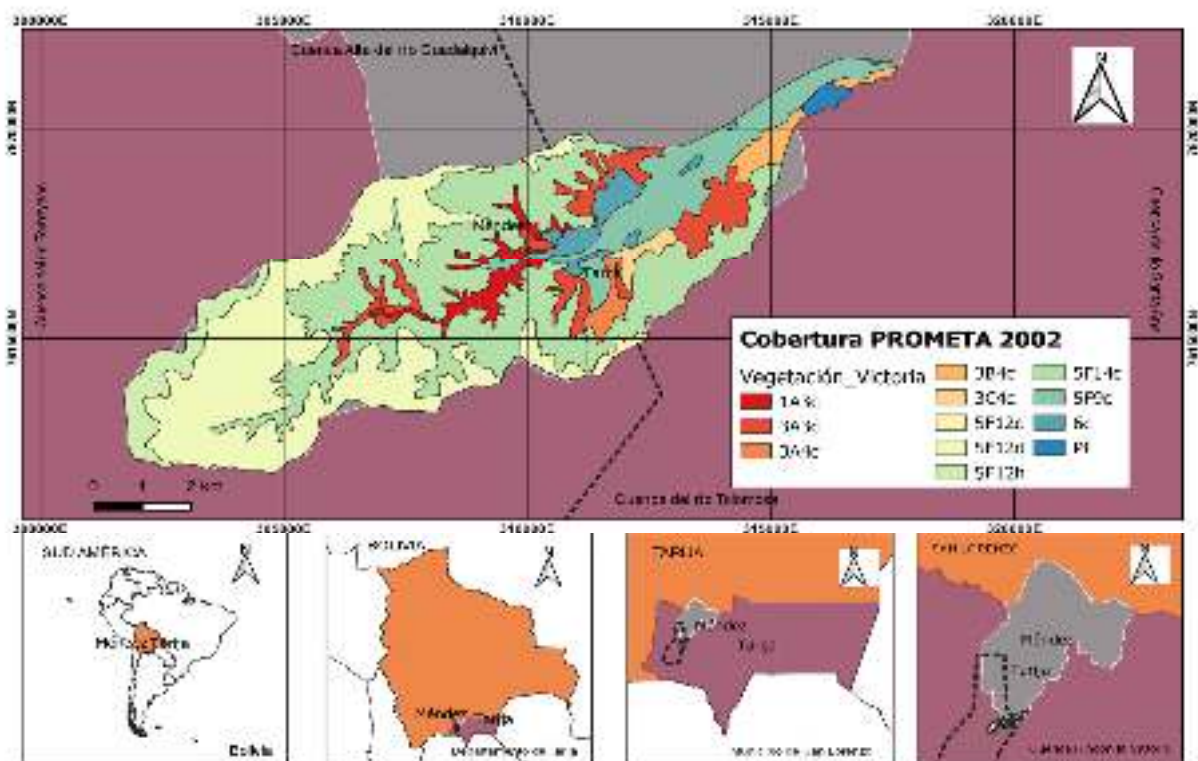


Figura 3.2. Cobertura vegetal cuenca La Victoria.

Fuente: Elaboración propia, con ayuda Software Qgis.

Para el mapa de tipo de suelo se empleó el mapa fisiográfico de La Fundación para el Desarrollo de la Ecología (FUNDECO) del año 2020, mismo que identifica tipos de suelo desde las geoestructuras y ecorregiones de la Victoria.

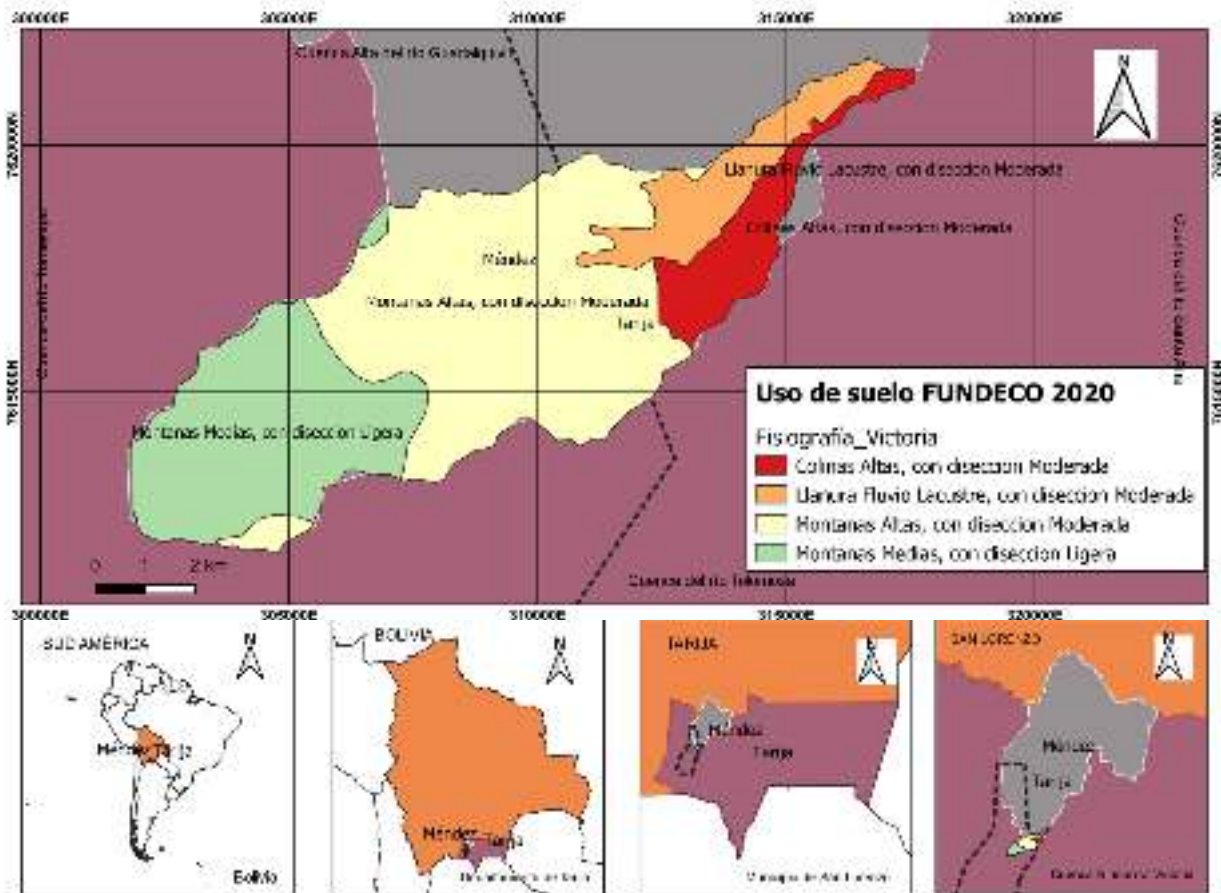


Figura 3.3. Mapa Fisiográfico cuenca La Victoria.

Fuente: Elaboración propia, con ayuda Software Qgis.

3.3.2. Información hidrometeorológica.

3.3.2.1. Información meteorológica.

Se utilizó información meteorológica de 5 fuentes diferentes para determinar la mejor fuente de datos para la cuenca Victoria. La tabla 3.3. caracteriza cada información.

Tabla 3.3. Información meteorológica.

| N° | Fuente | Descripción | Formato | Variables |
|----|----------|--|---|---|
| 1 | SENAMHI | Información meteorológica nacional de 5 estaciones seleccionadas: Campanario, Tucumillas, Coimata, Turumayu y San Andrés | Serie de tiempo mensuales desde 1980 a 2023. Espacialmente relacionadas por polígonos de Thiessen | Precipitación Temperatura Velocidad del Viento** Fracción de Nubosidad** Humedad Relativa** |
| 2 | CHIRPS | Información meteorológica mundial de 5 estaciones seleccionadas: Campanario, Tucumillas, Coimata, Turumayu y San Andrés | Serie de tiempo mensuales desde 1980 a 2023. Espacialmente relacionadas por polígonos de Thiessen | Precipitación |
| 3 | GMET2020 | Información meteorológica nacional grillada* | Serie de tiempo mensuales desde 1980 a 2020. Escala espacial de 0.1° (10 km) | Precipitación Temperatura Velocidad del Viento Fracción de Nubosidad Humedad Relativa |
| 4 | RAIN4BO | Información meteorológica nacional grillada* | Serie de tiempo mensuales desde 1980 a 2015. Escala espacial de 0.1° (10 km) | Precipitación |

| | | | | |
|---|----------|---|--|---|
| 5 | MTDR2020 | Información meteorológica nacional de 2 estaciones seleccionadas: Victoria y Rincón de la Victoria* | Series de tiempo mensuales desde 1980 a 2020. Espacialmente relacionadas por polígonos de Thiessen | Precipitación Temperatura Velocidad del Viento Fracción de Nubosidad Humedad Relativa |
|---|----------|---|--|---|

Fuente: Elaboración propia.

* La información fue solicitada a PROCUENCA-GIZ, quienes brindaron acceso a los datos.

** Solamente para estaciones con disponibilidad de datos.

3.3.2.2. Información hidrométrica.

En relación con la información hidrométrica en la cuenca La Victoria se cuenta con aforos que se realizaron en el río en donde se encuentra la obra de toma del sistema de agua potable que abastece a ciudad de Tarija, también se tiene aforos en el canal del sistema. La ubicación de los puntos de aforo se muestra en la Figura 3.4.

En la Tabla⁴3.4. se muestra el detalle de la información, en el caso de los aforos en canal se tiene datos para los años 2017 hasta el 2020 y el 2021 solo se tiene 3 meses de aforo. En el caso de los aforos en el río solo se tiene información completa el año 2019.

Tabla 3.4. Aforos Victoria.

| Nº | Victoria | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 |
|----|---|------|------|------|------|------|
| 1 | Aforo en el Canal del Rincón la Vitoria | | | | | 3 |
| 2 | Aforos en el Rio del Rincón la Vitoria | 1 | 9 | | 2 | |

Fuente: COSAALT R.L., 2022.

⁴Celdas sombreadas: Años donde se cuenta con información completa en todos los meses.

Celdas en blancas: Años donde no se tiene información.

Celdas con números: Número de meses al año en los que se tiene información.

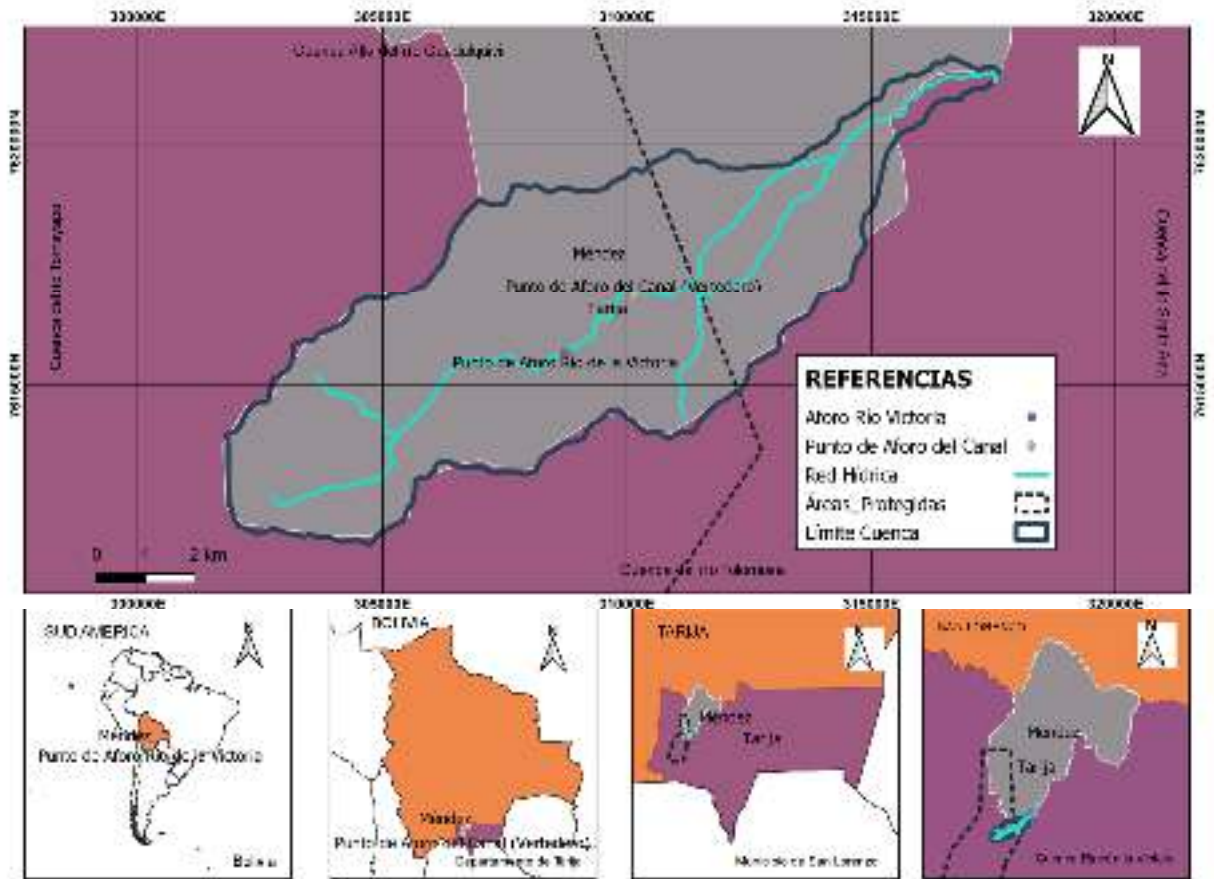


Figura 3.4. Puntos de aforo.

Fuente: Elaboración propia, con ayuda Software Qgis.

3.3.3. Información Demográfica y cédulas de cultivo.

Para la cuenca de la Victoria se utilizaron registros de datos del Censo de Hogar y Vivienda 2012, mismo que tiene información válida para 3 comunidades: Comunidad de Cadillar, Comunidad de la Victoria y Comunidad del Rincón de la Victoria.

Tabla 3.5. Información demográfica.

| Departamento | Provincia | Municipio | Ciudad/Organización | Población (hab.) |
|--------------|-----------|-------------------------------------|-----------------------|------------------|
| Tarija | Méndez | PRIMERA SECCIÓN (Villa San Lorenzo) | CADILLAR | 188 |
| Tarija | Méndez | PRIMERA SECCIÓN (Villa San Lorenzo) | LA VICTORIA | 561 |
| Tarija | Méndez | PRIMERA SECCIÓN (Villa San Lorenzo) | RINCON DE LA VICTORIA | 257 |

Fuente: Elaboración propia, en base al Censo Nacional de Población y Vivienda 2012.

En cuanto a la actividad agrícola y productiva se emplearon las fichas comunales agropecuarias del 2013 para las 3 comunidades mencionadas. En cada caso se identificó el tipo de cultivo y la cantidad en Hectáreas de cada cultivo.

Tabla 3.6. Cultivos La Victoria.

| Producción LA VICTORIA | | | |
|-------------------------------|------------------------|------------------------|----------------------------|
| Cultivos | Superficie (ha) | Producción (qq) | Rendimiento (kg/ha) |
| Verano | 51,8 | | |
| Papa | 12,5 | 734,0 | 2.694,7 |
| Maíz | 12,1 | 141,0 | 538,3 |
| TCV Flores | 6,0 | 0,0 | 0,0 |
| Arveja verde | 5,6 | 75,0 | 618,8 |
| Manzanilla | 4,4 | 116,5 | 1.218,4 |
| TCV hortalizas | 4,3 | 0,0 | 0,0 |
| Avena | 2,5 | 237,5 | 4.326,7 |
| TCV frutas | 1,1 | 0,0 | 0,0 |
| Maní | 1,0 | 30,0 | 1.380,0 |
| Otros cultivos | 2,4 | | |

Fuente: Elaboración propia, en base al Censo Agropecuario 2013.

Tabla 3.7. Cultivos Rincón de La Victoria.

| Producción RINCON DE LA VICTORIA | | | |
|---|------------------------|------------------------|----------------------------|
| Cultivos | Superficie (ha) | Producción (qq) | Rendimiento (kg/ha) |
| Verano | 141,4 | | |
| Maíz | 55,2 | 1.199,3 | 999,9 |
| Papa | 34,8 | 1.369,5 | 1.812,4 |
| TCV frutas | 17,5 | 0,0 | 0,0 |
| Arveja verde | 11,6 | 212,1 | 842,3 |
| Alfalfa | 9,0 | 262,0 | 1.339,1 |
| TCV Flores | 3,8 | 0,0 | 0,0 |
| TCV-otros en general | 2,9 | 0,0 | 0,0 |
| Cebolla | 1,3 | 80,8 | 2.971,6 |
| Manzanilla | 1,2 | 92,8 | 3.558,3 |
| Otros cultivos | 4,4 | | |

Fuente: Elaboración propia, en base al Censo Agropecuario 2013.

Tabla 3.8. Cultivos Cadillar.

| Producción CADILLAR | | | |
|----------------------------|------------------------|------------------------|----------------------------|
| Cultivos | Superficie (ha) | Producción (qq) | Rendimiento (kg/ha) |
| Verano | 21,3 | | |
| Maíz | 5,9 | 213,0 | 1.660,7 |
| Papa | 4,3 | 305,0 | 3.301,2 |
| TCV Flores | 4,0 | 0,0 | 0,0 |
| TCV hortalizas | 2,9 | 0,0 | 0,0 |
| Cebolla | 1,4 | 151,0 | 5.145,2 |
| Manzanilla | 0,8 | 10,0 | 613,3 |
| Arveja verde | 0,3 | 20,0 | 3.066,7 |
| Nabo | 0,3 | 6,0 | 920,0 |
| Avena | 0,3 | 50,0 | 9.200,0 |
| Otros cultivos | 1,3 | | |

Fuente: Elaboración propia, en base al Censo Agropecuario 2013.

En los casos se realizó una comparación con las cédulas de cultivos de estudios hidrológicos similares como el MTDR Guadalquivir (PROCUENCA).

3.4. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN.

3.4.1. Análisis de la información meteorológica.

La información meteorológica se analizó en función de la distribución espacial y temporal de los datos de cada variable.

3.4.1.1. Precipitación.

Se realizó una comparación de las 5 fuentes de datos meteorológicos. Especialmente la información se encuentra limitada para los productos SENMAHI, CHIRPS y MTDR Guadalquivir ya que estos cuentan con información puntual, es decir que los datos tienen que ser analizados mediante polígonos de Thiessen para representarlos adecuadamente (entre 23 y 1 km²). Por su parte, la precipitación de GMET2020 y RAIN4BO tiene una resolución de 0.1° lo que mejora su distribución espacial. En todas las fuentes de datos se tiene una escala espacial homogénea de aproximada de 1 km².

Se utilizaron los estadísticos de R², Coeficiente de Pearson, Coeficiente de Nash Sutcliffe y BIAS porcentual para comparar las series de tiempo, tomando como base de comparación la información de las estaciones SENAMHI.

Tabla 3.9. Comparación datos meteorológicos (Precipitación).

| N° | Estaciones | Pp med sim. (mm) | Pp med Obs. (mm) | Nash | PBIAS [%] | R ² | Correlación Pearson |
|----|-----------------------------|------------------|------------------|--------|-----------|----------------|---------------------|
| 1 | Campanario. SENAMHI-RAIN4BO | 48,77 | 29,31 | 0,4 | -27,92 | 0,86 | 0,92 |
| 2 | Campanario. SENAMHI-CHIRPS | 41,78 | 29,31 | 0,5 | -21,3 | 0,7 | 0,84 |
| 3 | Campanario. SENAMHI-GMET | 45,89 | 29,31 | 0,51 | -27,03 | 0,87 | 0,94 |
| 4 | Campanario. SENAMHI-MTDR | 242,03 | 29,31 | -73,52 | -65,28 | 0,01 | 0,09 |
| 5 | Coimata. SENAMHI-RAIN4BO | 59,77 | 58,2 | 0,89 | -0,95 | 0,89 | 0,94 |
| 6 | Coimata. SENAMHI-CHIRPS | 50,93 | 58,2 | 0,68 | 4,24 | 0,69 | 0,83 |
| 7 | Coimata. SENAMHI-GMET | 58,84 | 58,2 | 0,84 | -3,59 | 0,84 | 0,92 |
| 8 | Coimata. SENAMHI-MTDR | 242,08 | 58,2 | -20,55 | -76,56 | 0,02 | 0,14 |
| 9 | Tucumillas. SENAMHI-RAIN4BO | 57,68 | 63,83 | 0,8 | 7,57 | 0,81 | 0,9 |
| 10 | Tucumillas. SENAMHI-CHIRPS | 48,14 | 63,83 | 0,66 | 16,36 | 0,73 | 0,86 |
| 11 | Tucumillas. SENAMHI-GMET | 55,06 | 63,83 | 0,73 | 9,43 | 0,75 | 0,87 |
| 12 | Tucumillas. SENAMHI-MTDR | 242,03 | 63,83 | -14,87 | -74,13 | 0,03 | 0,19 |
| 13 | San Andres. SENAMHI-RAIN4BO | 69,27 | 85,91 | 0,85 | 24,81 | 0,94 | 0,97 |
| 14 | San Andres. SENAMHI-CHIRPS | 53,34 | 85,91 | 0,59 | 29,37 | 0,78 | 0,88 |
| 15 | San Andres. SENAMHI-GMET | 72,47 | 85,91 | 0,79 | 12,96 | 0,82 | 0,91 |
| 16 | San Andres. SENAMHI-MTDR | 242,03 | 85,91 | -9,54 | -68,09 | 0,05 | 0,23 |
| 17 | Turumayo. SENAMHI-RAIN4BO | 62,37 | 66,84 | 0,88 | 2,92 | 0,89 | 0,94 |
| 18 | Turumayo. SENAMHI-CHIRPS | 52,89 | 66,84 | 0,72 | 9,32 | 0,77 | 0,88 |
| 19 | Turumayo. SENAMHI-GMET | 63,8 | 66,84 | 0,81 | -0,4 | 0,81 | 0,9 |
| 20 | Turumayo. SENAMHI-MTDR | 242,08 | 66,84 | -15,09 | -37,53 | 0,04 | 0,19 |
| 21 | Aeropuerto. SENAMHI-RAIN4BO | 55,31 | 47,92 | 0,89 | -10,71 | 0,91 | 0,96 |
| 22 | Aeropuerto. SENAMHI-CHIRPS | 52,81 | 47,92 | 0,71 | -10,41 | 0,74 | 0,86 |

| | | | | | | | |
|----|-----------------------------|--------|-------|--------|--------|------|------|
| 23 | Aeropuerto. SENAMHI-GMET | 53,01 | 47,92 | 0,89 | -8,02 | 0,89 | 0,95 |
| 24 | Aeropuerto. SENAMHI-MTDR | 49,69 | 47,92 | 0,95 | -1,77 | 0,95 | 0,98 |
| | Min | 41,78 | 29,31 | -73,52 | -76,56 | 0,01 | 0,09 |
| | Prom | 94,25 | 58,67 | -4,98 | -13,2 | 0,66 | 0,75 |
| | Max | 242,08 | 85,91 | 0,95 | 29,37 | 0,95 | 0,98 |

Fuente: Elaboración propia.

Las casillas de color verde implican en estadísticos aceptables, las casillas de color azul los estadísticos que sobrepasan umbrales óptimos pero que se podrían ajustar en situaciones particulares y las casillas con numeración de color rojo son aquellas que son inaceptables por completo.

Finalmente se identificó que la mejor información de precipitación para la cuenca la Victoria es el producto Climático GMET2020.

3.4.1.2. Temperatura.

Se realizó una comparación de las 3 fuentes de datos meteorológicos que tiene la variable: SENAMHI, MTDR Guadalquivir y GMET2020. Especialmente la información se encuentra limitada para los productos SENMAHI y MTDR Guadalquivir ya que estos cuentan con información puntual, es decir que los datos tienen que ser analizados mediante polígonos de Thiessen para representarlos adecuadamente (entre 23 y 1 km²).

Por su parte, la temperatura de GMET2020 tiene una resolución de 0.1° lo que mejora su distribución espacial. En todas las fuentes de datos se tiene una escala espacial homogénea de aproximada de 1 km².

Se utilizaron los estadísticos de R², Coeficiente de Pearson, Delta de temperatura media absoluta, Delta de temperatura de la mediana absoluta y BIAS porcentual para comparar las series de tiempo, tomando como base de comparación la información de las estaciones SENAMHI.

Tabla 3.10. Comparación datos meteorológicos (Temperatura).

| Nº | Estaciones | T med sim. [°C] | T med Obs. [°C] | Delta T med [°C] | T mediana sim. [°C] | T mediana Obs. [°C] | Delta T mediana [°C] | PBIAS [%] | R ² | Correlación Pearson |
|----|--------------------------|-----------------|-----------------|------------------|---------------------|---------------------|----------------------|-----------|----------------|---------------------|
| 1 | Campanario. SENAMHI-GMET | 12.89 | 10.20 | 2.69 | 13.16 | 10.50 | 2.66 | -15.51 | 0.67 | 0.82 |
| 2 | Campanario. SENAMHI-MTDR | 14.02 | 10.20 | 3.82 | 14.62 | 10.50 | 4.12 | -20.62 | 0.70 | 0.84 |
| 3 | Coimata. SENAMHI-GMET | 14.38 | 19.73 | 5.36 | 14.87 | 18.20 | 3.33 | 23.32 | 0.21 | 0.45 |
| 4 | Coimata. SENAMHI-MTDR | 14.02 | 19.73 | 5.71 | 14.62 | 18.20 | 3.58 | 26.17 | 0.18 | 0.42 |
| 5 | Tucumillas. SENAMHI-GMET | 14.38 | 14.67 | 0.30 | 14.87 | 14.80 | 0.07 | -0.03 | 0.75 | 0.87 |
| 6 | Tucumillas. SENAMHI-MTDR | 14.02 | 14.67 | 0.65 | 14.62 | 14.80 | 0.18 | 0.88 | 0.70 | 0.84 |
| 7 | San Andres. SENAMHI-GMET | 14.71 | 17.73 | 3.03 | 15.26 | 18.28 | 3.02 | 13.66 | 0.87 | 0.93 |
| 8 | San Andres. SENAMHI-MTDR | 14.02 | 17.73 | 3.71 | 14.62 | 18.28 | 3.65 | 17.43 | 0.82 | 0.91 |
| 9 | Turumayo. SENAMHI-GMET | 14.71 | 18.49 | 3.79 | 15.26 | 19.20 | 3.94 | 13.74 | 0.86 | 0.93 |
| 10 | Turumayo. SENAMHI-MTDR | 14.02 | 18.49 | 4.47 | 14.62 | 19.20 | 4.58 | 16.71 | 0.86 | 0.93 |
| 11 | Aeropuerto. SENAMHI-GMET | 16.26 | 18.20 | 1.94 | 17.03 | 19.15 | 2.12 | 11.56 | 0.98 | 0.99 |
| 12 | Aeropuerto. SENAMHI-MTDR | 18.05 | 18.20 | 0.15 | 19.00 | 19.15 | 0.15 | 0.52 | 0.98 | 0.99 |
| | Min | 12.89 | 10.20 | 0.15 | 13.16 | 10.50 | 0.07 | -20.62 | 0.18 | 0.42 |
| | Prom | 14.62 | 16.51 | 2.97 | 15.21 | 16.69 | 2.62 | 7.32 | 0.72 | 0.83 |
| | Max | 18.05 | 19.73 | 5.71 | 19.00 | 19.20 | 4.58 | 26.17 | 0.98 | 0.99 |

Fuente: Elaboración propia.

Las casillas de color verde implican en estadísticos aceptables y las casillas de color azul los estadísticos que sobrepasan umbrales óptimos pero que se podrían ajustar en situaciones particulares.

Finalmente se identificó que la mejor información de Temperatura para la cuenca la Victoria es el producto Climático GMET2020.

3.4.1.3. Velocidad del Viento, Humedad relativa, Fracción de nubosidad y Evapotranspiración de referencia.

Para la distribución de estas variables se analizó la información disponible de 3 productos climáticos: SENMAHI, GMET2020 y MTDR Guadalquivir. Se llegó a las siguientes conclusiones:

- En cuanto a la información SENMAHI, no se cuenta con información completa de estas variables, únicamente la estación de referencia Aeropuerto es la que tiene información comparable.
- La información de GMET2020 y MTDR Guadalquivir tiene la misma información. Ambos presentan series de tiempo multianuales promedio.

Como estas variables son información meteorológica secundaria para el modelo WEAP, se determinó utilizar la información MTDR Guadalquivir (Actualización WEAP Guadalquivir 2023).

3.4.2. Construcción de la cobertura de Uso de Suelo

La cobertura de uso de suelo de WEAP empleada para la cuenca de la victoria se la obtuvo mediante una intersección del mapa de cobertura vegetal (PROMETA, 2002) y el mapa de Tipo de suelo – fisiográfico (FUNDECO, 2020). Con el mapa de Tipo de suelo – fisiográfico se identificaron las unidades hidrológicas entre los tipos de grupos hidrológicos A, B, C y D (PROMETA, 2002). Se construyó un mapa nuevo con esa tipología.

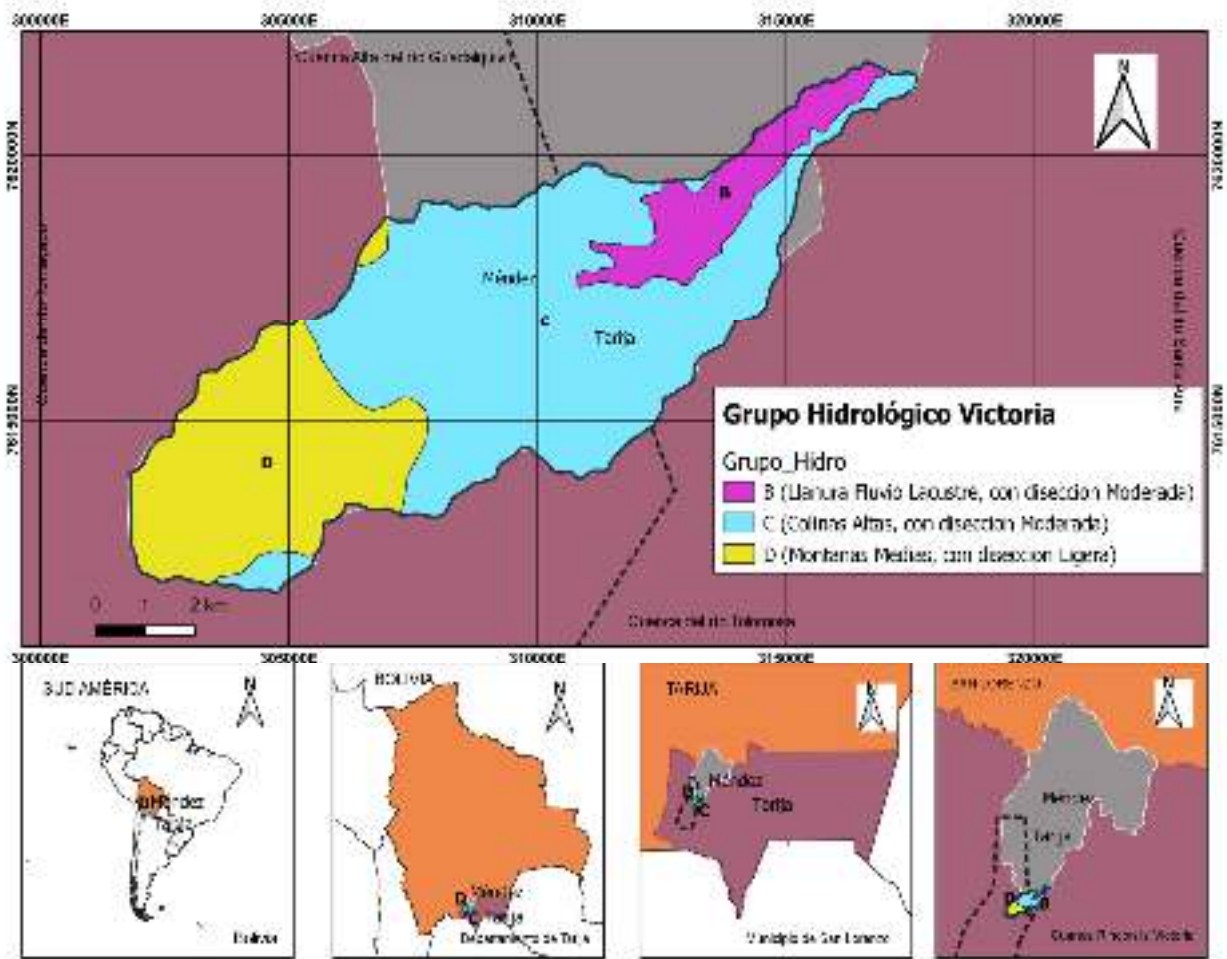


Figura 3.5. Grupo Hidrológico Victoria.

Fuente: Elaboración propia, con ayuda Software Qgis.

Utilizando QGIS se construyó un nuevo mapa que representa la cobertura de uso de suelo en WEAP combinando el mapa de cobertura vegetal con el mapa de grupo hidrológico.

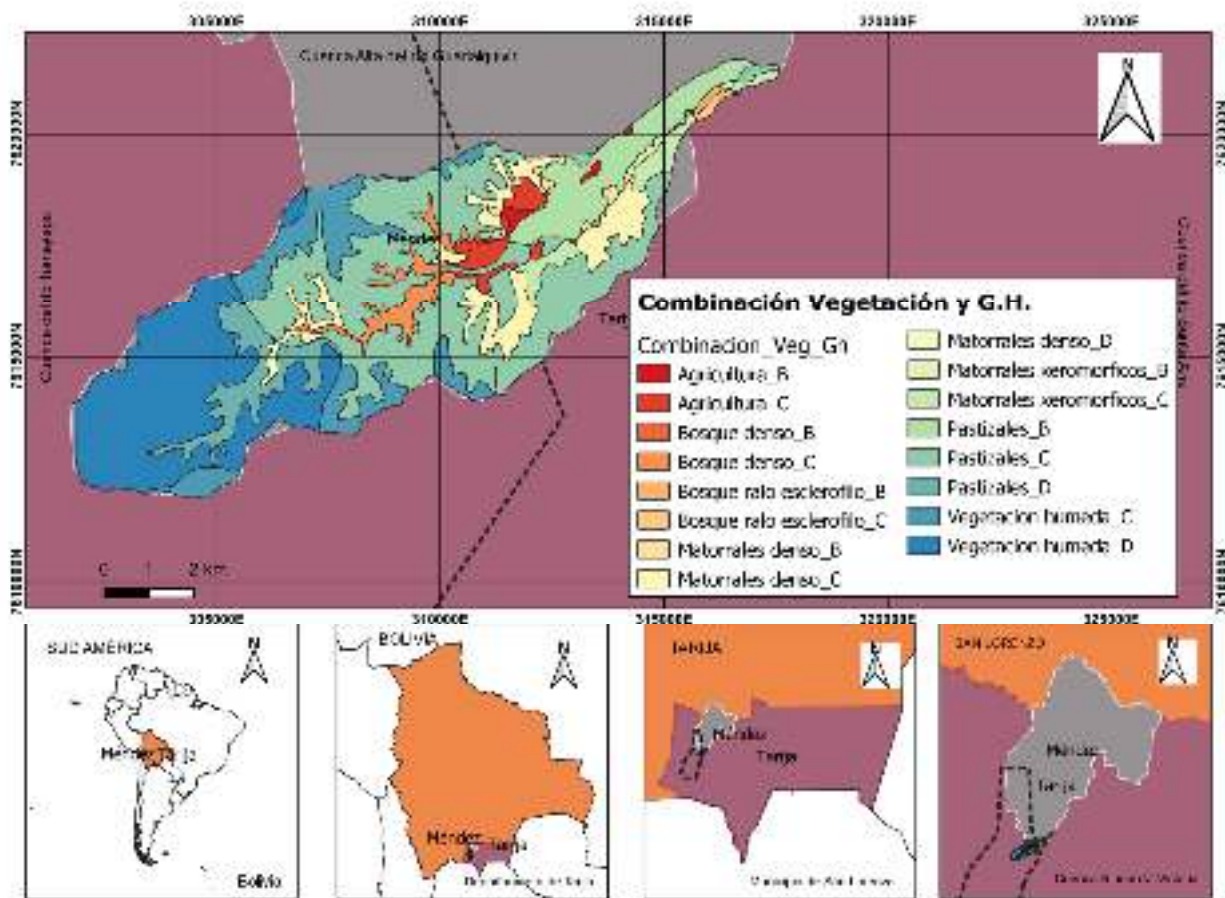


Figura 3.6. Combinación Vegetación y Grupo Hidrológico.

Fuente: Elaboración propia, con ayuda Software Qgis.

Finalmente se rasterizó el shape y se guardó el archivo en formato raster - NETCDF para hacerlo compatible con WEAP.

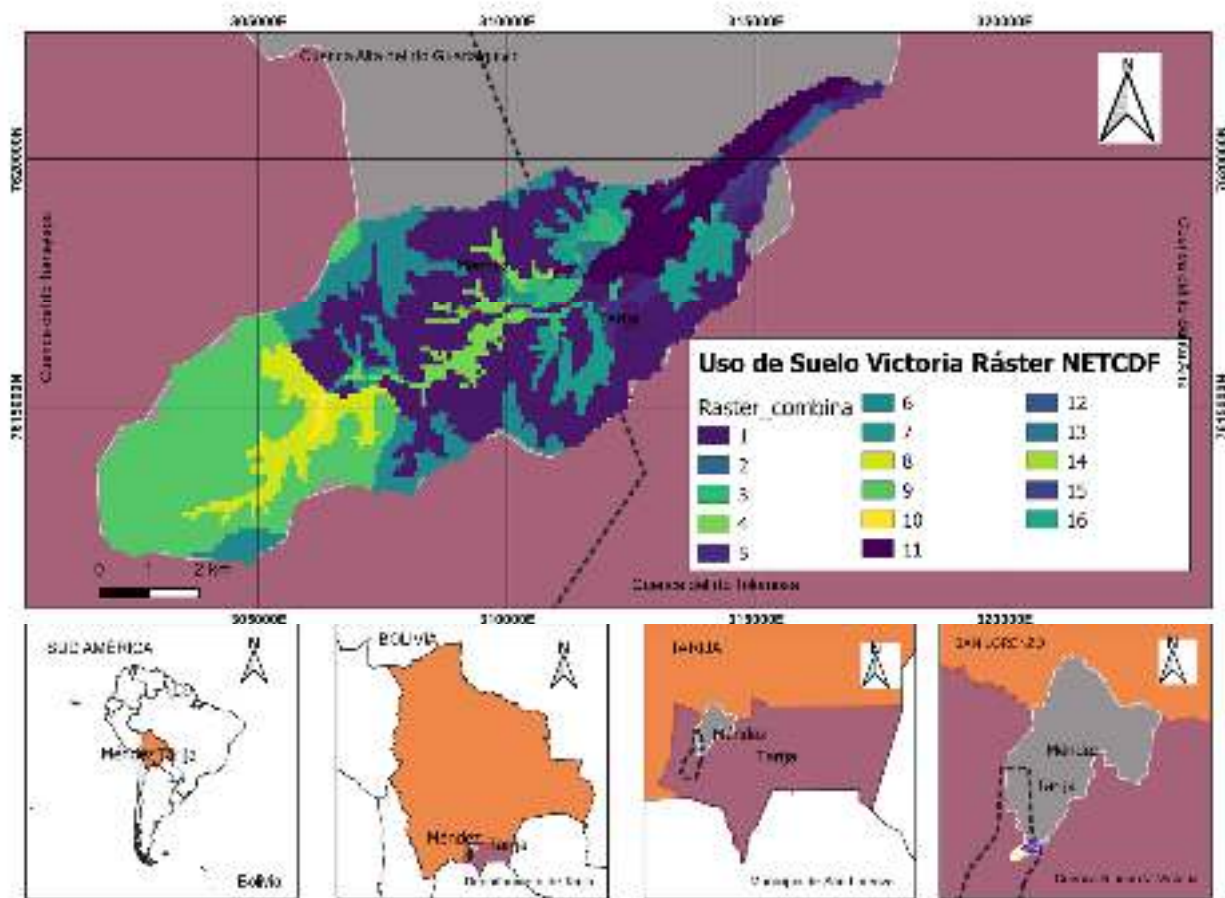


Figura 3.7. Victoria Ráster NETCDF.

Fuente: Elaboración propia, con ayuda Software Qgis.

Los valores del raster del 1 al 16 véase en Anexo 6.

3.4.3. Esquematización y construcción del Modelo WEAP.

La cuenca Victoria se ha esquematizado en 4 subcuencas de interés delimitadas por 4 factores principales:

3.4.3.1. Factor Altitudinal.

En base a un estudio de la altura en un DEM de 30 metros de resolución se identificaron 4 niveles altitudinales que responden a una subclasificación de micro ecosistemas.

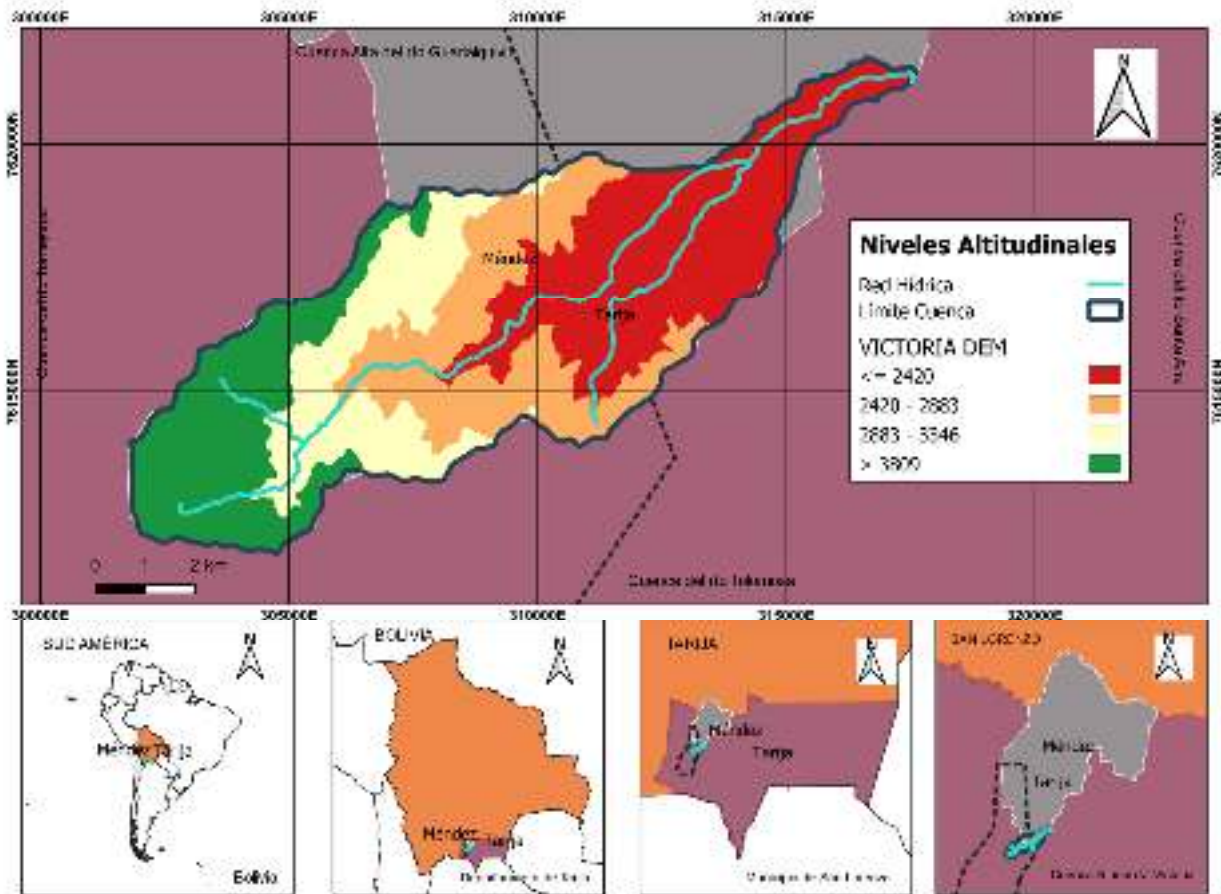


Figura 3.8. Niveles Altitudinales.

Fuente: Elaboración propia, con ayuda Software Qgis.

3.4.3.2. Factor de influencia del área de incendio.

El área de incendio se despliega en la mayor parte del sector central de la cuenca e identificar posibles espacios por los cuales se podría clasificar la cuenca.

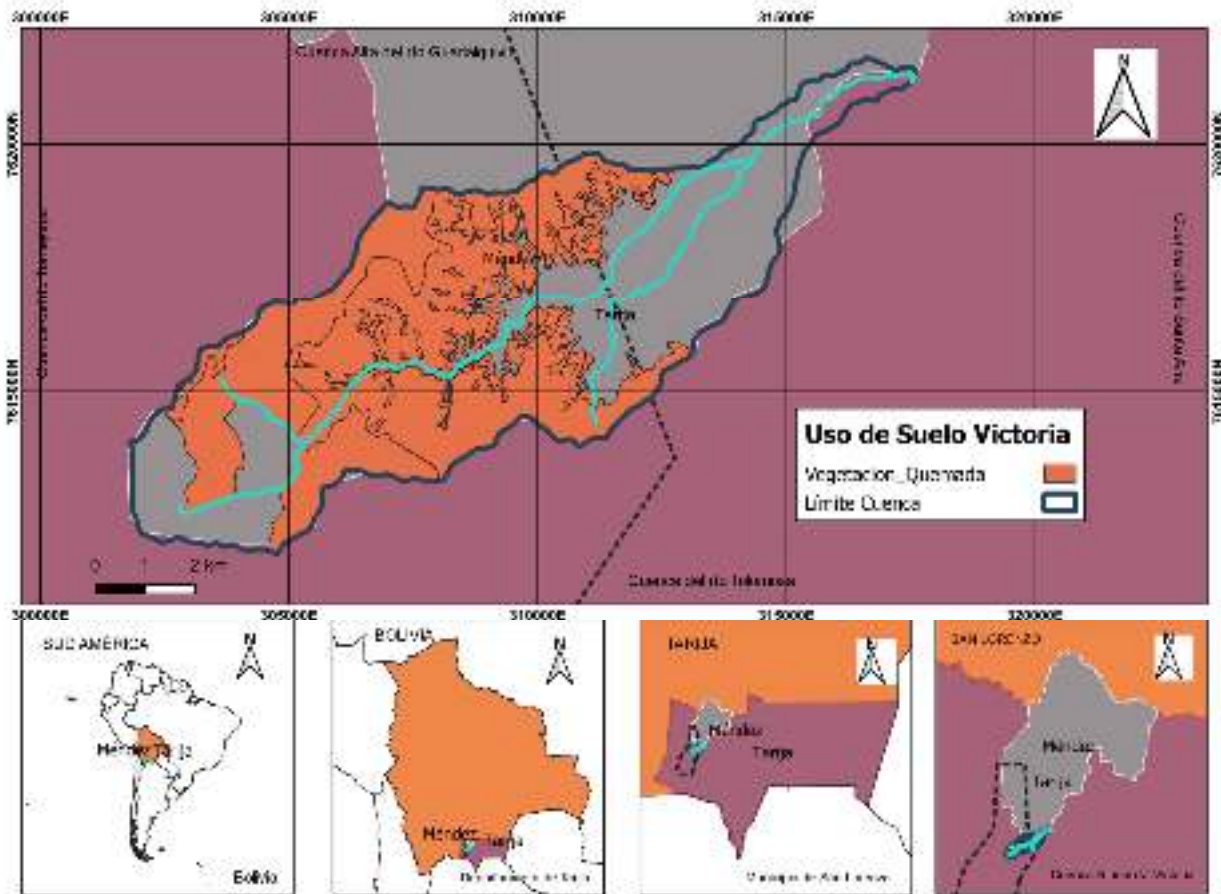


Figura 3.9. Área de Incendio.

Fuente: Elaboración propia, con ayuda Software Qgis.

3.4.3.3. Factor de la actividad agrícola y asentamientos humanos.

La mayor concentración de actividad agrícola se vincula en la segunda mitad de la cuenca. Una vez que termina la zona boscosa o de cobertura vegetal semidensa inicia la población del Rincón de la Victoria, seguido de Victoria y Cadillar. Todas con actividad agrícola intensiva.

Adicionalmente se encuentra la Toma IV. Un canal de agua que extrae fuertes cantidades de agua del río principal y lo exporta directamente a la ciudad de Tarija. Estos elementos también intervienen en el ordenamiento de la cuenca y su delimitación.

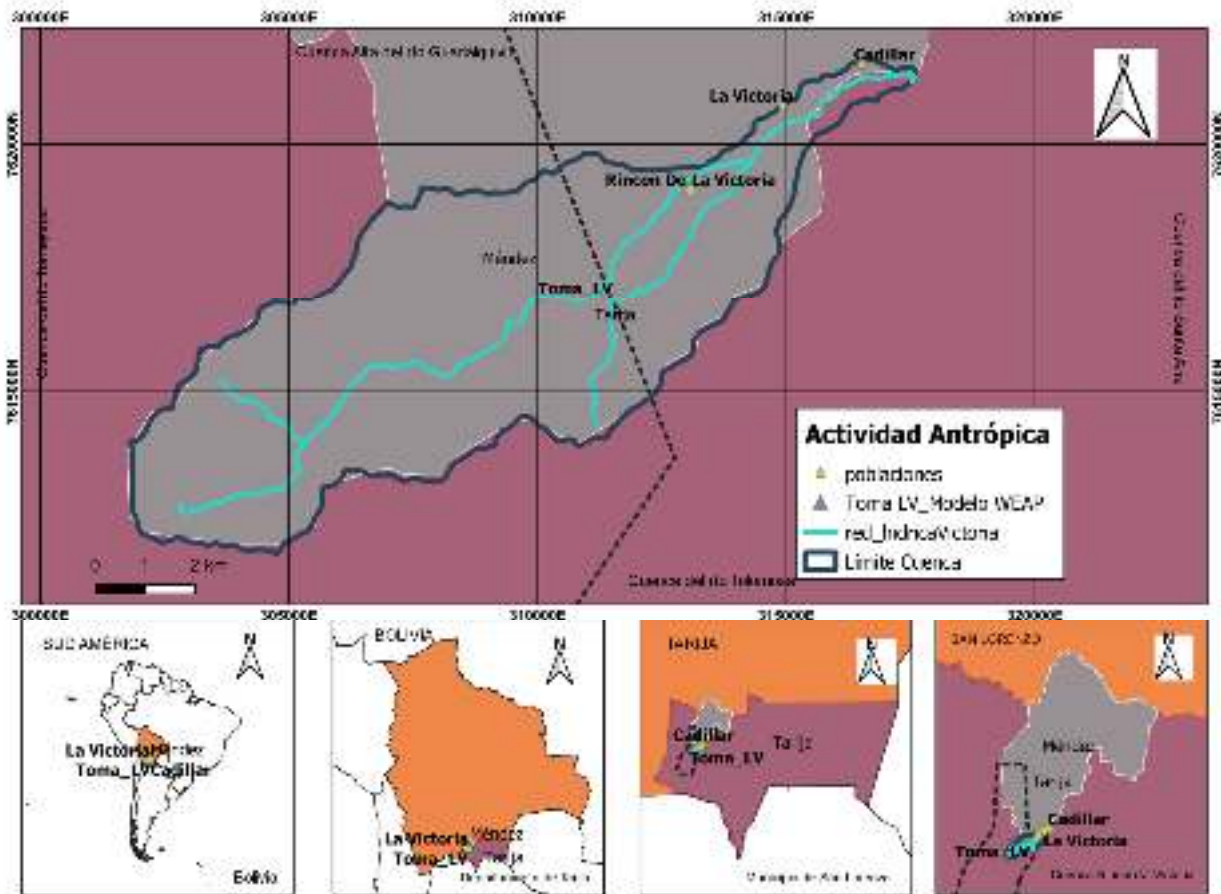


Figura 3.10. Actividad Antrópica.

Fuente: Elaboración propia, con ayuda Software Qgis.

3.4.3.4. Factor del Riesgo Hídrico.

Según el estudio de Molina (PROMETA, 2002) existen áreas de riesgo hídrico evaluadas en Victoria del 2002. Estas nos ayudan a clarificar las áreas de interés hidrológico a las cuales debemos atender.

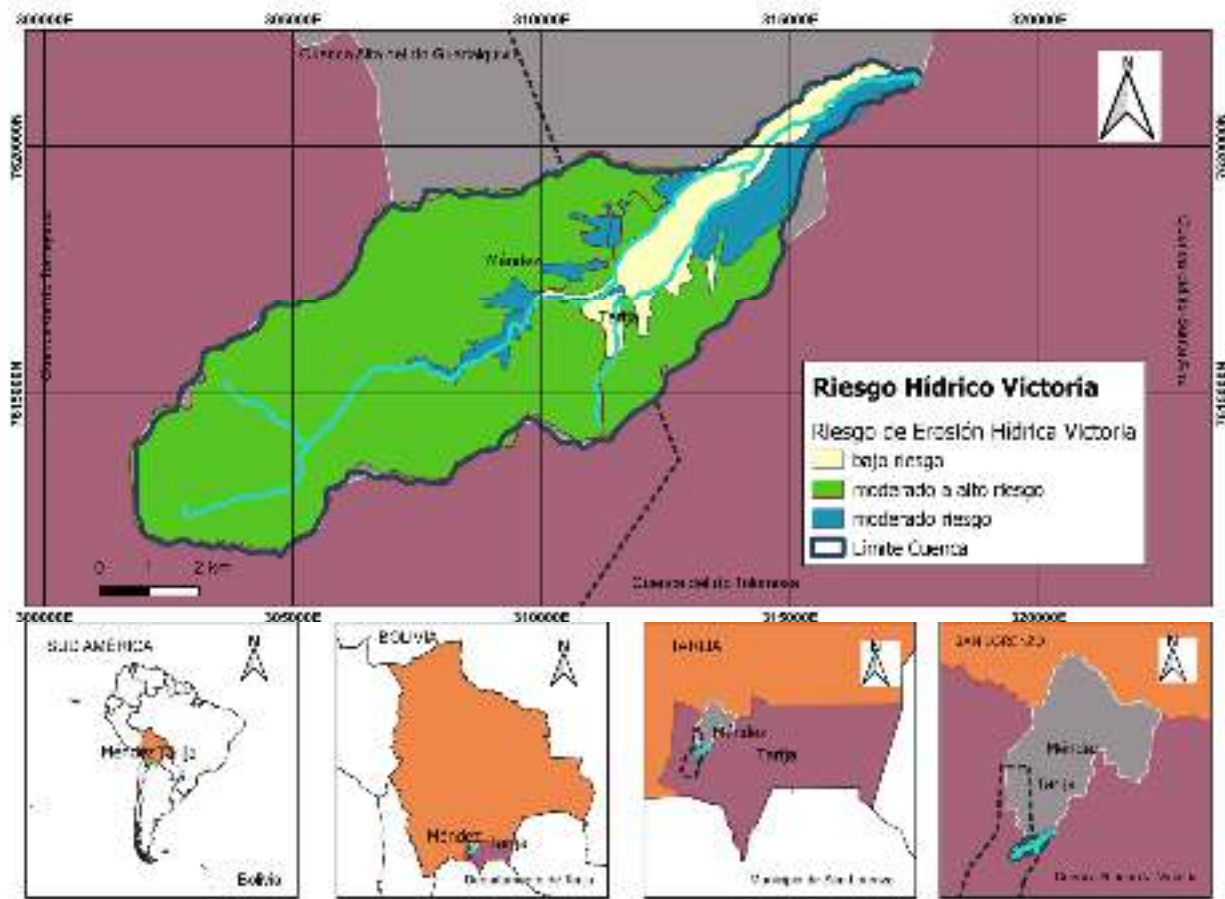


Figura 3.11. Riesgo Hídrico Victoria.

Fuente: Elaboración propia, con ayuda Software Qgis.

Finalmente se delimito la cuenca en 4 unidades hidrológicas incluyendo los criterios de los 4 factores de delimitación y que sirvieron de apoyo para delimitar los sitios de demanda, las unidades hidrológicas, los sistemas de riego, la toma de agua y la ubicación de la estación hidrométrica.

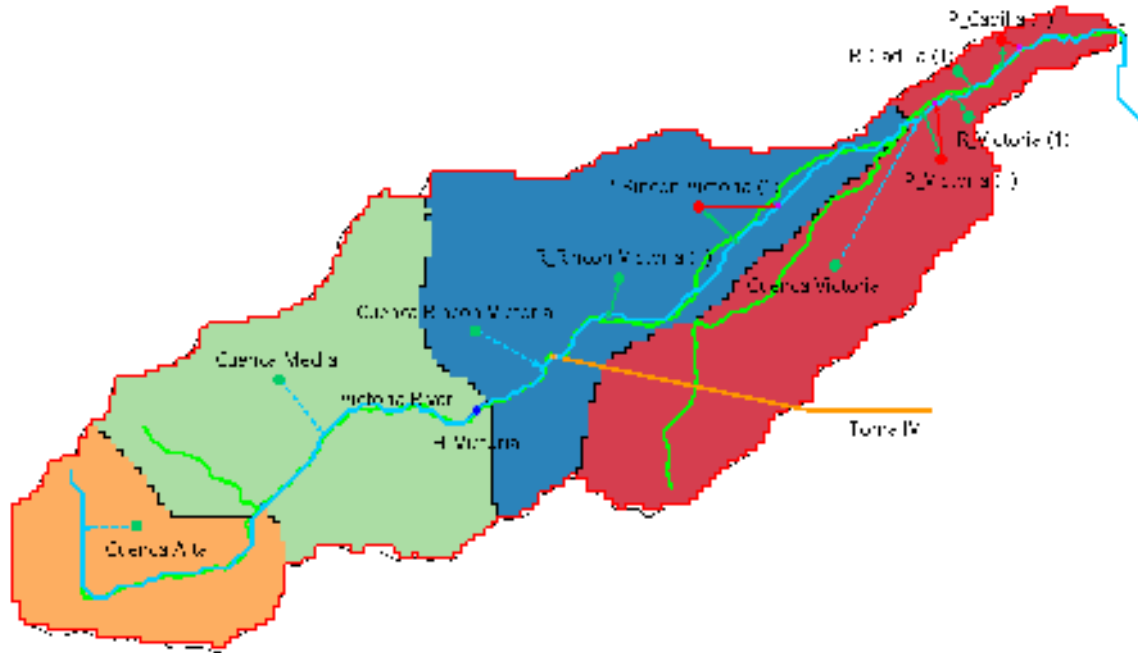


Figura 3.12. Delimitación Unidades Hidrológicas.

Fuente: Elaboración propia, con ayuda Software WEAP.

3.4.4. Identificación de parámetros de Modelación y programación en WEAP.

3.4.4.1. Supuestos clave.

- **Hidrología.**

En el supuesto clave de Hidrología se colocaron los factores de modelación de WEAP del método de Escorrentía de lluvia (método de humedad del suelo) que se utilizaran para el modelo WEAP de la Victoria.

Tabla 3.11. Factores de modelación (Cuentas corrientes).

| Cuentas corrientes | | | | | | | | | |
|---------------------------|------|-----|----|-----|------|-----|-----|----|----|
| Uso de suelo | KC | RRF | Ks | Sw | f | Dw | Kd | Z1 | Z2 |
| Agricultura_B | 0,7 | 4 | 60 | 210 | 0,65 | 500 | 200 | 80 | 15 |
| Agricultura_C | 0,7 | 4 | | 210 | 0,65 | | | | |
| Bosque denso_B | 1,05 | 5 | | 200 | 0,55 | | | | |
| Bosque denso_C | 1,05 | 5 | | 200 | 0,55 | | | | |
| Bosque ralo esclerofilo_B | 0,8 | 5 | | 190 | 0,55 | | | | |
| Bosque ralo esclerofilo_C | 0,8 | 5 | | 190 | 0,55 | | | | |
| Matorral denso_B | 0,9 | 1,9 | | 350 | 0,9 | | | | |
| Matorral denso_C | 0,9 | 1,9 | | 350 | 0,9 | | | | |
| Matorral denso_D | 0,9 | 1,9 | | 350 | 0,9 | | | | |
| Matorral xeromórfico_B | 0,9 | 1,9 | | 350 | 0,9 | | | | |
| Matorral xeromórfico_C | 0,9 | 1,9 | | 350 | 0,9 | | | | |
| Pastizales_B | 0,75 | 4,5 | | 150 | 0,65 | | | | |
| Pastizales_C | 0,75 | 4,5 | | 150 | 0,65 | | | | |
| Población_D | 0,75 | 4,5 | | 150 | 0,65 | | | | |
| Vegetación húmeda_C | 0,7 | 1,9 | | 350 | 0,9 | | | | |
| Vegetación húmeda_D | 0,7 | 1,9 | | 350 | 0,9 | | | | |

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de bibliografía.

Tabla 3.12. Factores de modelación (Reference/ Incendios).

| Reference / Incendios | | | | | | | | | |
|---------------------------|------|------|----|-----|------|-----|-----|----|----|
| Uso de suelo | KC | RRF | Ks | Sw | f | Dw | Kd | Z1 | Z2 |
| Agricultura_B | 0,9 | 1 | 40 | 210 | 0,65 | 200 | 200 | 80 | 15 |
| Agricultura_C | 0,9 | 1 | | 210 | 0,65 | | | | |
| Bosque denso_B | 1,25 | 1,1 | | 200 | 0,55 | | | | |
| Bosque denso_C | 1,25 | 1,1 | | 200 | 0,55 | | | | |
| Bosque ralo esclerofilo_B | 1 | 1,1 | | 190 | 0,55 | | | | |
| Bosque ralo esclerofilo_C | 1 | 1,1 | | 190 | 0,55 | | | | |
| Matorral denso_B | 1,1 | 0,5 | | 350 | 0,9 | | | | |
| Matorral denso_C | 1,1 | 0,5 | | 350 | 0,9 | | | | |
| Matorral denso_D | 1,1 | 0,5 | | 350 | 0,9 | | | | |
| Matorral xeromórfico_B | 1,1 | 0,5 | | 350 | 0,9 | | | | |
| Matorral xeromórfico_C | 1,1 | 0,5 | | 350 | 0,9 | | | | |
| Pastizales_B | 0,95 | 1,05 | | 150 | 0,65 | | | | |
| Pastizales_C | 0,95 | 1,05 | | 150 | 0,65 | | | | |
| Población_D | 0,95 | 1,05 | | 150 | 0,65 | | | | |
| Vegetación húmeda_C | 0,9 | 0,5 | | 350 | 0,9 | | | | |
| Vegetación húmeda_D | 0,9 | 0,5 | | 350 | 0,9 | | | | |

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de bibliografía.

- **Área total Victoria.**

Se creó un supuesto clave que identifica el área total de la cuenca calculada en WEAP. Presenta el valor 6192 ha. Este dato fue utilizado para calcular el cambio de la cobertura vegetal y uso de suelo en el escenario de incendio.

- **Cobertura 2016 a 2020.**

Este supuesto clave contiene series de tiempo mensual del cambio de la cobertura vegetal de la cuenca Victoria de los años 2016, 2017, 2018, 2019, 2020 y 2021.

Para su cálculo se utilizó un estudio profundo del NDVI en relación con el tipo de cobertura vegetal propuesto por Molina (PROMETA, 2002).

Tabla 3.13. Área por tipo de cobertura en cada rango NDVI (Julio – 2002).

| Área por tipo de cobertura en cada rango de NDVI (Julio – 2002) | | | | | | |
|--|-----------------|-----------------|----------------|----------------|---------------|--------------|
| AREAS (Ha) | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | A6 |
| Pastizales C | 223,845 | 855,836 | 299,962 | 51,324 | 8,084 | 1,027 |
| Agricultura C | 0,294 | 2,098 | 3,238 | 0,778 | | |
| Bosque denso C | 35,954 | 15,405 | 21,105 | 16,609 | 5,255 | 1,335 |
| Vegetacion humeda C | 214,384 | 339,249 | 21,465 | 2,384 | 0,114 | |
| Matorrales denso C | 44,936 | 33,308 | 58,024 | 32,859 | 2,321 | |
| Pastizales D | 61,647 | 175,758 | 37,02 | 3,135 | 0,091 | |
| Vegetacion humeda D | 572,738 | 298,964 | 19,152 | 1,539 | 0,091 | |
| Matorrales denso D | 1,558 | 12,527 | 6,199 | 0,131 | | |
| Pastizales B | | 4,014 | 7,521 | 0,35 | | |
| Agricultura B | 0,006 | 0,733 | 0,799 | 0,182 | | |
| Bosque denso B | 0,673 | 1,06 | 0,162 | | | |
| Matorrales denso B | | 1,227 | 7,938 | 2,803 | 0,029 | |
| SUMA | 1156,035 | 1740,179 | 482,585 | 112,094 | 15,985 | 2,362 |

Fuente: Elaboración propia, con ayuda Software Qgis.

En función del tipo de cobertura se determinó el cambio porcentual por área en cada rango del NDVI (A1, A2, A3, A4, A5 y A6).

Tabla 3.14. Porcentaje de área por tipo de cobertura en cada rango NDVI (Julio – 2002).

| Porcentaje del área por tipo de cobertura en cada rango de NDVI (Julio – 2002) | | | | | | |
|---|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| AREAS (%) | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | A6 |
| Pastizales C | 19,3632 | 49,1809 | 62,1573 | 45,7866 | 50,5724 | 43,4801 |
| Agricultura C | 0,0254 | 0,1206 | 0,6710 | 0,6941 | 0,0000 | 0,0000 |
| Bosque denso C | 3,1101 | 0,8853 | 4,3733 | 14,8170 | 32,8746 | 56,5199 |
| Vegetacion humeda C | 18,5448 | 19,4951 | 4,4479 | 2,1268 | 0,7132 | 0,0000 |
| Matorrales denso C | 3,8871 | 1,9141 | 12,0236 | 29,3138 | 14,5199 | 0,0000 |
| Pastizales D | 5,3326 | 10,1000 | 7,6712 | 2,7968 | 0,5693 | 0,0000 |
| Vegetacion humeda D | 49,5433 | 17,1801 | 3,9686 | 1,3730 | 0,5693 | 0,0000 |
| Matorrales denso D | 0,1348 | 0,7199 | 1,2845 | 0,1169 | 0,0000 | 0,0000 |
| Pastizales B | 0,0000 | 0,2307 | 1,5585 | 0,3122 | 0,0000 | 0,0000 |
| Agricultura B | 0,0005 | 0,0421 | 0,1656 | 0,1624 | 0,0000 | 0,0000 |
| Bosque denso B | 0,0582 | 0,0609 | 0,0336 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| Matorrales denso B | 0,0000 | 0,0705 | 1,6449 | 2,5006 | 0,1814 | 0,0000 |
| SUMA | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Excel.

Después se realiza un estudio del cambio del NDVI para cada año propuesto para el estudio.

Tabla 3.15. Cambio de NDVI para los años de estudio.

| AÑO | AREA_1 (ha) | AREA_2 (ha) | AREA_3 (ha) | AREA_4 (ha) | AREA_5 (ha) | AREA_6 (ha) | AREA_TOTAL (ha) |
|----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|----------------------------|
| 2015 | 27,1 | 666,8 | 2437,6 | 439 | 16,7 | 0 | 3587,2 |
| 2016 | 55,7 | 824,1 | 2305,4 | 371,7 | 15,5 | 0,1 | 3572,5 |
| 2017 | 16,5 | 1504,6 | 2003,1 | 57,7 | 7,8 | 0,8 | 3590,5 |
| 2018 | 44 | 630,6 | 2606,8 | 306,2 | 2,8 | 0 | 3590,4 |
| 2019 | 40,9 | 751,7 | 2626 | 169,8 | 2,2 | 0 | 3590,6 |
| 2020 | 33 | 734 | 2513 | 307,6 | 2,9 | 0 | 3590,5 |
| 2021 | 33,7 | 736,7 | 2570,3 | 248,2 | 1,6 | 0 | 3590,5 |
| 2022 | 16,3 | 589,6 | 2579,2 | 396,4 | 8,9 | 0,1 | 3590,5 |
| 2023 | 36 | 610,2 | 2447,8 | 482,3 | 14,2 | 0 | 3590,5 |
| MAX | 55,700 | 1504,600 | 2626,000 | 482,300 | 16,700 | 0,800 | 3590,6 |
| MIN | 16,300 | 589,600 | 2003,100 | 57,700 | 1,600 | 0,000 | 3572,5 |
| PROMEDIO | 33,689 | 783,144 | 2454,356 | 308,767 | 8,067 | 0,111 | 3588,25 |
| R² | 0,019 | 0,72 | 0,41 | 0,71 | 0,938 | 0,22 | |

Fuente: Elaboración propia, con ayuda Software Qgis.

Finalmente se obtuvo el cambio porcentual del área por tipo de cobertura para cada año.

Tabla 3.16. Cambio porcentual de área año 2016.

| 2016 | | | | | | | | |
|---------------------|---------------|----------------|-----------------|----------------|---------------|--------------|---------------|------------|
| Tipo de Cobertura | A1 (ha) | A2 (ha) | A3 (ha) | A4 (ha) | A5 (ha) | A6 (ha) | Total (ha) | % |
| Pastizales C | 10,785 | 405,3 | 1432,975 | 170,189 | 7,839 | 0,043 | 2027,131 | 56,743 |
| Agricultura C | 0,014 | 0,994 | 15,469 | 2,58 | 0,000 | 0,000 | 19,056 | 0,533 |
| Bosque denso C | 1,732 | 7,295 | 100,823 | 55,075 | 5,096 | 0,057 | 170,077 | 4,761 |
| Vegetacion humeda C | 10,329 | 160,659 | 102,542 | 7,905 | 0,111 | 0,000 | 281,546 | 7,881 |
| Matorrales denso C | 2,165 | 15,774 | 277,192 | 108,959 | 2,251 | 0,000 | 406,34 | 11,374 |
| Pastizales D | 2,97 | 83,234 | 176,852 | 10,396 | 0,088 | 0,000 | 273,54 | 7,657 |
| Vegetacion humeda D | 27,596 | 141,581 | 91,493 | 5,103 | 0,088 | 0,000 | 265,861 | 7,442 |
| Matorrales denso D | 0,075 | 5,932 | 29,614 | 0,434 | 0,000 | 0,000 | 36,056 | 1,009 |
| Pastizales B | 0,000 | 1,901 | 35,929 | 1,161 | 0,000 | 0,000 | 38,991 | 1,091 |
| Agricultura B | 0,000 | 0,347 | 3,817 | 0,604 | 0,000 | 0,000 | 4,768 | 0,133 |
| Bosque denso B | 0,032 | 0,502 | 0,774 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 1,308 | 0,037 |
| Matorrales denso B | 0,000 | 0,581 | 37,921 | 9,295 | 0,028 | 0,000 | 47,825 | 1,339 |
| SUMA | 55,700 | 824,100 | 2305,400 | 371,700 | 15,500 | 0,100 | 3572,5 | 100 |

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Excel.

Tabla 3.17. Cambio porcentual de área año 2017.

| 2017 | | | | | | | | |
|---------------------|---------|---------|-----------|---------|---------|---------|------------|--------|
| Tipo de Cobertura | A1 (ha) | A2 (ha) | A3 (ha) | A4 (ha) | A5 (ha) | A6 (ha) | Total (ha) | % |
| Pastizales C | 3,195 | 739,976 | 1,245,074 | 26,419 | 3,945 | 0,348 | 2,018,956 | 56,23 |
| Agricultura C | 0,004 | 1,814 | 13,44 | 0,400 | 0,000 | 0,000 | 15,659 | 0,436 |
| Bosque denso C | 0,513 | 13,32 | 87,602 | 8,549 | 2,564 | 0,452 | 113,001 | 3,147 |
| Vegetacion humeda C | 3,06 | 293,323 | 89,096 | 1,227 | 0,056 | 0,000 | 386,762 | 10,772 |
| Matorrales denso C | 0,641 | 28,799 | 240,844 | 16,914 | 1,133 | 0,000 | 288,331 | 8,03 |
| Pastizales D | 0,88 | 151,965 | 153,662 | 1,614 | 0,044 | 0,000 | 308,164 | 8,583 |
| Vegetacion humeda D | 8,175 | 258,491 | 79,496 | 0,792 | 0,044 | 0,000 | 346,998 | 9,664 |
| Matorrales denso D | 0,022 | 10,831 | 25,731 | 0,067 | 0,000 | 0,000 | 36,651 | 1,021 |
| Pastizales B | 0,000 | 3,471 | 31,218 | 0,18 | 0,000 | 0,000 | 34,869 | 0,971 |
| Agricultura B | 0,000 | 0,634 | 3,316 | 0,094 | 0,000 | 0,000 | 4,044 | 0,113 |

| | | | | | | | | |
|--------------------|---------------|-----------------|-----------------|---------------|--------------|--------------|---------------|------------|
| Bosque denso B | 0,010 | 0,917 | 0,672 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 1,599 | 0,045 |
| Matorrales denso B | 0,000 | 1,061 | 32,949 | 1,443 | 0,014 | 0,000 | 35,467 | 0,988 |
| SUMA | 16,500 | 1504,600 | 2003,100 | 57,700 | 7,800 | 0,800 | 3590,5 | 100 |

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Excel.

Tabla 3.18. Cambio porcentual de área año 2018.

| 2018 | | | | | | | | |
|---------------------|---------------|----------------|-----------------|----------------|--------------|--------------|----------------|------------|
| Tipo de Cobertura | A1 (ha) | A2 (ha) | A3 (ha) | A4 (ha) | A5 (ha) | A6 (ha) | Total (ha) | % |
| Pastizales C | 8,520 | 310,135 | 1,620,318 | 140,198 | 1,416 | 0,000 | 2080,587 | 57,949 |
| Agricultura C | 0,011 | 0,76 | 17,491 | 2,125 | 0,000 | 0,000 | 20,388 | 0,568 |
| Bosque denso C | 1,368 | 5,582 | 114,004 | 45,37 | 0,92 | 0,000 | 167,245 | 4,658 |
| Vegetacion humeda C | 8,160 | 122,936 | 115,948 | 6,512 | 0,02 | 0,000 | 253,576 | 7,063 |
| Matorrales denso C | 1,71 | 12,07 | 313,431 | 89,759 | 0,407 | 0,000 | 417,376 | 11,625 |
| Pastizales D | 2,346 | 63,691 | 199,973 | 8,564 | 0,016 | 0,000 | 274,589 | 7,648 |
| Vegetacion humeda D | 21,799 | 108,338 | 103,454 | 4,204 | 0,016 | 0,000 | 237,811 | 6,624 |
| Matorrales denso D | 0,059 | 4,539 | 33,485 | 0,358 | 0,000 | 0,000 | 38,442 | 1,071 |
| Pastizales B | 0,000 | 1,455 | 40,627 | 0,956 | 0,000 | 0,000 | 43,037 | 1,199 |
| Agricultura B | 0,000 | 0,266 | 4,316 | 0,497 | 0,000 | 0,000 | 5,079 | 0,141 |
| Bosque denso B | 0,026 | 0,384 | 0,875 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 1,285 | 0,036 |
| Matorrales denso B | 0,000 | 0,445 | 42,879 | 7,657 | 0,005 | 0,000 | 50,986 | 1,42 |
| SUMA | 44,000 | 630,600 | 2606,800 | 306,200 | 2,800 | 0,000 | 3590,40 | 100 |

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Excel.

Tabla 3.19. Cambio porcentual de área año 2019.

| 2019 | | | | | | | | |
|---------------------|---------|---------|-----------|---------|---------|---------|------------|--------|
| Tipo de Cobertura | A1 (ha) | A2 (ha) | A3 (ha) | A4 (ha) | A5 (ha) | A6 (ha) | Total (ha) | % |
| Pastizales C | 7,92 | 369,693 | 1,632,252 | 77,746 | 1,113 | 0,000 | 2088,722 | 58,172 |
| Agricultura C | 0,010 | 0,906 | 17,62 | 1,179 | 0,000 | 0,000 | 19,715 | 0,549 |
| Bosque denso C | 1,272 | 6,654 | 114,843 | 25,159 | 0,723 | 0,000 | 148,653 | 4,14 |
| Vegetacion humeda C | 7,585 | 146,544 | 116,802 | 3,611 | 0,016 | 0,000 | 274,559 | 7,647 |
| Matorrales denso C | 1,590 | 14,388 | 315,739 | 49,775 | 0,319 | 0,000 | 381,811 | 10,634 |
| Pastizales D | 2,181 | 75,922 | 201,445 | 4,749 | 0,013 | 0,000 | 284,31 | 7,918 |
| Vegetacion humeda D | 20,263 | 129,143 | 104,216 | 2,331 | 0,013 | 0,000 | 255,966 | 7,129 |

| | | | | | | | | |
|--------------------|---------------|----------------|-----------------|----------------|--------------|--------------|----------------|------------|
| Matorrales denso D | 0,055 | 5,411 | 33,732 | 0,198 | 0,000 | 0,000 | 39,397 | 1,097 |
| Pastizales B | 0,000 | 1,734 | 40,926 | 0,530 | 0,000 | 0,000 | 43,190 | 1,203 |
| Agricultura B | 0,000 | 0,317 | 4,348 | 0,276 | 0,000 | 0,000 | 4,940 | 0,138 |
| Bosque denso B | 0,024 | 0,458 | 0,882 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 1,363 | 0,038 |
| Matorrales denso B | 0,000 | 0,530 | 43,195 | 4,246 | 0,004 | 0,000 | 47,975 | 1,336 |
| SUMA | 40,900 | 751,700 | 2626,000 | 169,800 | 2,200 | 0,000 | 3590,60 | 100 |

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Excel.

Tabla 3.20. Cambio porcentual de área año 2020.

| 2020 | | | | | | | | |
|---------------------|---------------|----------------|-----------------|----------------|--------------|--------------|----------------|------------|
| Tipo de Cobertura | A1 (ha) | A2 (ha) | A3 (ha) | A4 (ha) | A5 (ha) | A6 (ha) | Total (ha) | % |
| Pastizales C | 6,39 | 360,988 | 1562,014 | 140,839 | 1,467 | 0,000 | 2071,698 | 57,699 |
| Agricultura C | 0,008 | 0,885 | 16,861 | 2,135 | 0,000 | 0,000 | 19,89 | 0,554 |
| Bosque denso C | 1,026 | 6,498 | 109,902 | 45,577 | 0,953 | 0,000 | 163,956 | 4,566 |
| Vegetacion humeda C | 6,12 | 143,094 | 111,776 | 6,542 | 0,021 | 0,000 | 267,552 | 7,452 |
| Matorrales denso C | 1,283 | 14,049 | 302,153 | 90,169 | 0,421 | 0,000 | 408,075 | 11,365 |
| Pastizales D | 1,760 | 74,134 | 192,777 | 8,603 | 0,017 | 0,000 | 277,29 | 7,723 |
| Vegetacion humeda D | 16,349 | 126,102 | 99,732 | 4,223 | 0,017 | 0,000 | 246,422 | 6,863 |
| Matorrales denso D | 0,044 | 5,284 | 32,281 | 0,359 | 0,000 | 0,000 | 37,968 | 1,057 |
| Pastizales B | 0,000 | 1,693 | 39,165 | 0,960 | 0,000 | 0,000 | 41,818 | 1,165 |
| Agricultura B | 0,000 | 0,309 | 4,161 | 0,499 | 0,000 | 0,000 | 4,969 | 0,138 |
| Bosque denso B | 0,019 | 0,447 | 0,844 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 1,310 | 0,036 |
| Matorrales denso B | 0,000 | 0,518 | 41,336 | 7,692 | 0,005 | 0,000 | 49,551 | 1,380 |
| SUMA | 33,000 | 734,000 | 2513,000 | 307,600 | 2,900 | 0,000 | 3590,50 | 100 |

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Excel.

Tabla 3.21. Cambio porcentual de área año 2021.

| 2021 | | | | | | | | |
|---------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|------------|--------|
| Tipo de Cobertura | A1 (ha) | A2 (ha) | A3 (ha) | A4 (ha) | A5 (ha) | A6 (ha) | Total (ha) | % |
| Pastizales C | 6,525 | 362,316 | 1597,63 | 113,642 | 0,809 | 0,000 | 2080,923 | 57,956 |
| Agricultura C | 0,009 | 0,888 | 17,246 | 1,723 | 0,000 | 0,000 | 19,865 | 0,553 |
| Bosque denso C | 1,048 | 6,522 | 112,408 | 36,776 | 0,526 | 0,000 | 157,279 | 4,380 |
| Vegetacion humeda C | 6,250 | 143,62 | 114,325 | 5,279 | 0,011 | 0,000 | 269,485 | 7,505 |

| | | | | | | | | |
|---------------------|---------------|----------------|-----------------|----------------|--------------|--------------|----------------|------------|
| Matorrales denso C | 1,310 | 14,101 | 309,042 | 72,757 | 0,232 | 0,000 | 397,442 | 11,069 |
| Pastizales D | 1,797 | 74,407 | 197,173 | 6,942 | 0,009 | 0,000 | 280,327 | 7,807 |
| Vegetacion humeda D | 16,696 | 126,566 | 102,006 | 3,408 | 0,009 | 0,000 | 248,684 | 6,926 |
| Matorrales denso D | 0,045 | 5,303 | 33,017 | 0,29 | 0,000 | 0,000 | 38,655 | 1,077 |
| Pastizales B | 0,000 | 1,699 | 40,058 | 0,775 | 0,000 | 0,000 | 42,532 | 1,185 |
| Agricultura B | 0,000 | 0,31 | 4,256 | 0,403 | 0,000 | 0,000 | 4,969 | 0,138 |
| Bosque denso B | 0,020 | 0,449 | 0,863 | 0 | 0,000 | 0,000 | 1,331 | 0,037 |
| Matorrales denso B | 0,000 | 0,519 | 42,279 | 6,206 | 0,003 | 0,000 | 49,007 | 1,365 |
| SUMA | 33,700 | 736,700 | 2570,300 | 248,200 | 1,600 | 0,000 | 3590,50 | 100 |

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Excel.

Esta información fue cargada como supuesto clave para el cambio de la cobertura de uso de suelo en WEAP para el escenario con incendios.

- **Cobertura 2015.**

En base a la metodología del anterior punto se creó el supuesto clave para el año 2015. Que sirve como referencia para conocer la dinámica del cambio del uso de suelo en WEAP para el año base (Cuentas corrientes).

Tabla 3.22. Cambio porcentual de área año 2015 (Cuentas corrientes).

| Tipo de Cobertura | 2015 | | | | | | Total (ha) | % |
|---------------------|---------|---------|-----------|---------|---------|---------|------------|--------|
| | A1 (ha) | A2 (ha) | A3 (ha) | A4 (ha) | A5 (ha) | A6 (ha) | | |
| Pastizales_C | 5,247 | 327,938 | 1,515,147 | 201,003 | 8,446 | 0,000 | 2057,782 | 57,365 |
| Agricultura C | 0,007 | 0,804 | 16,356 | 3,047 | 0,000 | 0,000 | 20,213 | 0,563 |
| Bosque denso C | 0,843 | 5,903 | 106,604 | 65,047 | 5,490 | 0,000 | 183,887 | 5,126 |
| Vegetacion humeda C | 5,026 | 129,993 | 108,423 | 9,337 | 0,119 | 0,000 | 252,897 | 7,05 |
| Matorrales denso C | 1,053 | 12,763 | 293,087 | 128,688 | 2,425 | 0,000 | 438,015 | 12,211 |
| Pastizales D | 1,445 | 67,347 | 186,993 | 12,278 | 0,095 | 0,000 | 268,158 | 7,475 |
| Vegetacion humeda D | 13,426 | 114,557 | 96,739 | 6,027 | 0,095 | 0,000 | 230,845 | 6,435 |
| Matorrales denso D | 0,037 | 4,8 | 31,312 | 0,513 | 0,000 | 0,000 | 36,662 | 1,022 |
| Pastizales B | 0,000 | 1,538 | 37,99 | 1,371 | 0,000 | 0,000 | 40,898 | 1,14 |
| Agricultura B | 0,000 | 0,281 | 4,036 | 0,713 | 0,000 | 0,000 | 5,03 | 0,14 |
| Bosque denso B | 0,016 | 0,406 | 0,818 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 1,24 | 0,035 |

| | | | | | | | | |
|--------------------|---------------|----------------|-----------------|----------------|---------------|--------------|----------------|------------|
| Matorrales denso B | 0,000 | 0,470 | 40,096 | 10,978 | 0,030 | 0,000 | 51,574 | 1,438 |
| SUMA | 27,100 | 666,800 | 2437,600 | 439,000 | 16,700 | 0,000 | 3587,20 | 100 |

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Excel.

Esta información fue cargada como supuesto clave para el cambio de la cobertura de uso de suelo en WEAP para el escenario con incendios.

3.4.4.2. Sitios de Demanda.

- Cuencas

Se crearon 4 unidades hidrológicas que responden a Cuenca Alta, Cuenca Media, Cuenca Rincón Victoria y Cuenca Victoria.

Para el área de la cuenca en función del tipo de cobertura vegetal, se determinó el área específico con el modo delimitación automática de cuenca. Llegando al siguiente resultado:

Tabla 3.23. Coberturas de Unidades Hidrológicas (Cuentas corrientes).

| Unidad hidrológica | Cobertura Cuentas Corrientes | Área (ha) |
|------------------------|------------------------------|-----------|
| Cuenca Alta | Pastizales_C | 33 |
| Cuenca Alta | Pastizales_D | 71 |
| Cuenca Alta | Vegetacion humeda_C | 70 |
| Cuenca Alta | Vegetacion humeda_D | 690 |
| Cuenca Media | Bosque denso_C | 29 |
| Cuenca Media | Matorrales denso_C | 73 |
| Cuenca Media | Matorrales denso_D | 18 |
| Cuenca Media | Pastizales_C | 427 |
| Cuenca Media | Pastizales_D | 253 |
| Cuenca Media | Vegetacion humeda_C | 299 |
| Cuenca Media | Vegetacion humeda_D | 717 |
| Cuenca Rincon Victoria | Agricultura_B | 37 |
| Cuenca Rincon Victoria | Agricultura_C | 118 |
| Cuenca Rincon Victoria | Bosque denso_B | 2 |
| Cuenca Rincon Victoria | Bosque denso_C | 171 |
| Cuenca Rincon Victoria | Matorrales denso_B | 17 |
| Cuenca Rincon Victoria | Matorrales denso_C | 118 |
| Cuenca Rincon Victoria | Pastizales_B | 215 |
| Cuenca Rincon Victoria | Pastizales_C | 988 |
| Cuenca Rincon Victoria | Vegetacion humeda_C | 181 |
| Cuenca Victoria | Agricultura_C | 19 |

| | | |
|-----------------|---------------------------|-----|
| Cuenca Victoria | Bosque ralo esclerofilo B | 10 |
| Cuenca Victoria | Bosque ralo esclerofilo C | 18 |
| Cuenca Victoria | Matorrales denso B | 22 |
| Cuenca Victoria | Matorrales denso C | 294 |
| Cuenca Victoria | Matorrales xeromorficos B | 26 |
| Cuenca Victoria | Matorrales xeromorficos C | 151 |
| Cuenca Victoria | Pastizales B | 267 |
| Cuenca Victoria | Pastizales C | 800 |
| Cuenca Victoria | Vegetacion humeda C | 58 |

Fuente: Elaboración propia, con ayuda Software WEAP.

Para escenarios de incendios se utilizó la variación porcentual.

En el caso del clima se utilizó las series de tiempo mensuales de precipitación y temperatura de GMET2020 de la grilla climática representativo para cada unidad hidrológica.

Tabla 3.24. Datos de precipitación extraídos de las grillas meteorológicas.

| Precipitación (mm/mes) | | | | |
|-------------------------------|--------------------|---------------------|-------------------------------|------------------------|
| Fecha | Cuenca Alta | Cuenca Media | Cuenca Rincón Victoria | Cuenca Victoria |
| 01/01/2014 | 273,6 | 261 | 229,8 | 228,7 |
| 01/02/2014 | 186,8 | 179,5 | 162,7 | 162 |
| 01/03/2014 | 79,37 | 88,07 | 94,38 | 93,93 |
| 01/04/2014 | 33,24 | 33,5 | 32,61 | 32,52 |
| 01/05/2014 | 16,32 | 18,61 | 19,82 | 19,74 |
| 01/06/2014 | 7,548 | 9,276 | 11,34 | 11,27 |
| 01/07/2014 | 2,558 | 2,612 | 2,63 | 2,628 |
| 01/08/2014 | 2,211 | 2,508 | 2,699 | 2,682 |
| 01/09/2014 | 11,52 | 12,44 | 12,9 | 12,85 |
| 01/10/2014 | 128,4 | 134,9 | 137,1 | 136,3 |
| 01/11/2014 | 105,1 | 102,4 | 91,07 | 90,67 |
| 01/12/2014 | 100,9 | 104,8 | 103,4 | 103 |
| 01/01/2015 | 294,1 | 288,4 | 267,7 | 267,2 |
| 01/02/2015 | 212,8 | 209,3 | 202,4 | 202,3 |
| 01/03/2015 | 179,9 | 164,3 | 138,2 | 137,9 |
| 01/04/2015 | 81,1 | 78,46 | 72,44 | 72,27 |
| 01/05/2015 | 8,84 | 11,14 | 13,18 | 13,17 |
| 01/06/2015 | 5,726 | 6,881 | 8,447 | 8,362 |
| 01/07/2015 | 4,363 | 9,492 | 14,65 | 14,65 |

| | | | | |
|------------|--------|-------|-------|-------|
| 01/08/2015 | 1,334 | 2,104 | 3,225 | 3,188 |
| 01/09/2015 | 6,086 | 6,578 | 6,777 | 6,79 |
| 01/10/2015 | 81,16 | 84,72 | 83,65 | 83,35 |
| 01/11/2015 | 87,75 | 83,48 | 76,14 | 75,82 |
| 01/12/2015 | 139,9 | 142,6 | 140,3 | 140,1 |
| 01/01/2016 | 154,6 | 146,5 | 134,4 | 134,2 |
| 01/02/2016 | 115,5 | 159,7 | 193,3 | 193,2 |
| 01/03/2016 | 35,64 | 39,47 | 41,62 | 41,35 |
| 01/04/2016 | 38,66 | 40,02 | 40,38 | 40,21 |
| 01/05/2016 | 12,03 | 22,41 | 31,68 | 31,66 |
| 01/06/2016 | 5,791 | 7,532 | 8,837 | 8,782 |
| 01/07/2016 | 3,189 | 3,146 | 3,011 | 2,981 |
| 01/08/2016 | 23,01 | 22,48 | 20,8 | 20,64 |
| 01/09/2016 | 17,11 | 17,71 | 17,78 | 17,66 |
| 01/10/2016 | 38,06 | 58,51 | 76,48 | 76,37 |
| 01/11/2016 | 89,22 | 98,09 | 103 | 102,8 |
| 01/12/2016 | 94,22 | 90,28 | 80,66 | 80,38 |
| 01/01/2017 | 151,8 | 145,4 | 127 | 126,5 |
| 01/02/2017 | 144,1 | 148,8 | 145,7 | 145,1 |
| 01/03/2017 | 159,8 | 173,8 | 179,7 | 179,1 |
| 01/04/2017 | 26,94 | 29,9 | 31,29 | 31,12 |
| 01/05/2017 | 1,532 | 4,144 | 6,449 | 6,476 |
| 01/06/2017 | 1,681 | 1,669 | 1,653 | 1,633 |
| 01/07/2017 | 1,28 | 2,524 | 3,623 | 3,638 |
| 01/08/2017 | 0,6182 | 1,046 | 1,514 | 1,511 |
| 01/09/2017 | 30,96 | 39,76 | 46,75 | 46,53 |
| 01/10/2017 | 26,6 | 29,35 | 30,45 | 30,42 |
| 01/11/2017 | 48,34 | 52,73 | 53,81 | 53,55 |
| 01/12/2017 | 156,4 | 157,4 | 151,3 | 150,7 |
| 01/01/2018 | 335,4 | 340,9 | 325,6 | 324 |
| 01/02/2018 | 168,4 | 164,6 | 151,1 | 150,6 |
| 01/03/2018 | 133,9 | 125,2 | 106 | 105,5 |
| 01/04/2018 | 26,33 | 31,25 | 32,42 | 32,29 |
| 01/05/2018 | 8,91 | 12,24 | 14,87 | 14,84 |
| 01/06/2018 | 3,633 | 7,949 | 11,89 | 11,86 |
| 01/07/2018 | 2,033 | 3,69 | 5,649 | 5,636 |
| 01/08/2018 | 5,209 | 4,734 | 4,073 | 4,067 |
| 01/09/2018 | 22,37 | 27,28 | 31,15 | 30,93 |
| 01/10/2018 | 66,68 | 76,48 | 83,03 | 82,96 |
| 01/11/2018 | 65,97 | 70,29 | 71,06 | 71,02 |

| | | | | |
|------------|--------|--------|--------|--------|
| 01/12/2018 | 169,3 | 159,1 | 142,3 | 142,2 |
| 01/01/2019 | 130,5 | 131,4 | 129,5 | 129,3 |
| 01/02/2019 | 151,4 | 154,7 | 149 | 148,6 |
| 01/03/2019 | 73,13 | 84,85 | 95,1 | 94,72 |
| 01/04/2019 | 66,27 | 72,37 | 76,25 | 75,94 |
| 01/05/2019 | 11,89 | 16,14 | 18,61 | 18,63 |
| 01/06/2019 | 2,956 | 7,808 | 12,07 | 12,08 |
| 01/07/2019 | 5,497 | 5,354 | 4,939 | 4,933 |
| 01/08/2019 | 9,997 | 8,763 | 6,549 | 6,593 |
| 01/09/2019 | 4,933 | 4,644 | 4,125 | 4,079 |
| 01/10/2019 | 44,05 | 49,27 | 54,76 | 54,6 |
| 01/11/2019 | 112,8 | 127,8 | 134,9 | 134,3 |
| 01/12/2019 | 138,2 | 174,8 | 197,3 | 196,8 |
| 01/01/2020 | 219,9 | 225,6 | 219,4 | 218,8 |
| 01/02/2020 | 139 | 157,2 | 167,7 | 166,8 |
| 01/03/2020 | 172,7 | 162,9 | 142,5 | 141,6 |
| 01/04/2020 | 18 | 38,19 | 53,65 | 53,58 |
| 01/05/2020 | 3,416 | 4,507 | 5,901 | 5,876 |
| 01/06/2020 | 2,269 | 5,775 | 9,202 | 9,182 |
| 01/07/2020 | 0,3553 | 4,037 | 7,409 | 7,414 |
| 01/08/2020 | 0 | 0,3802 | 0,7041 | 0,7056 |
| 01/09/2020 | 23,73 | 26,66 | 28,51 | 28,42 |
| 01/10/2020 | 81,48 | 88,97 | 91,62 | 91,28 |
| 01/11/2020 | 62,63 | 61,01 | 54,99 | 54,84 |
| 01/12/2020 | 169,2 | 188,8 | 201,8 | 200,9 |

Fuente: Elaboración propia, en base a información de las grillas.

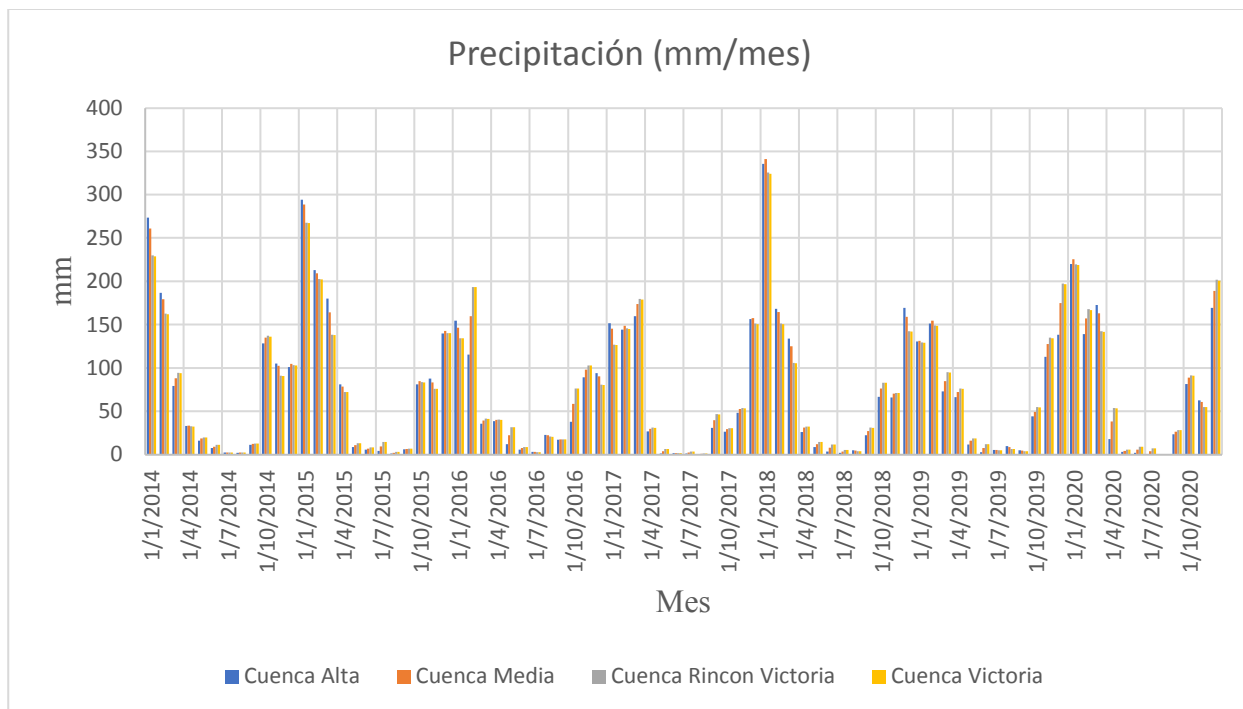


Figura 3.13. Precipitación en la Cuenca del río La Victoria

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Excel.

Tabla 3.25. Datos de temperatura extraídos de las grillas meteorológicas.

| Temperatura (C°/mes) | | | | |
|----------------------|-------------|--------------|------------------------|-----------------|
| Fecha | Cuenca alta | Cuenca Media | Cuenca rincón Victoria | Cuenca Victoria |
| 01/01/2014 | 14,62 | 15,35 | 16,91 | 16,9 |
| 01/02/2014 | 13,75 | 14,49 | 16,09 | 16,08 |
| 01/03/2014 | 13,67 | 14,28 | 15,6 | 15,59 |
| 01/04/2014 | 13,88 | 14,41 | 15,57 | 15,56 |
| 01/05/2014 | 11,34 | 11,86 | 12,98 | 12,97 |
| 01/06/2014 | 11,31 | 11,63 | 12,3 | 12,3 |
| 01/07/2014 | 10,02 | 10,41 | 11,25 | 11,24 |
| 01/08/2014 | 11,59 | 12,11 | 13,23 | 13,22 |
| 01/09/2014 | 15,04 | 15,51 | 16,52 | 16,51 |
| 01/10/2014 | 15,79 | 16,44 | 17,82 | 17,81 |
| 01/11/2014 | 15,07 | 15,66 | 16,95 | 16,94 |
| 01/12/2014 | 15,19 | 15,84 | 17,25 | 17,24 |
| 01/01/2015 | 13,61 | 14,42 | 16,15 | 16,14 |
| 01/02/2015 | 14,34 | 15,08 | 16,68 | 16,67 |
| 01/03/2015 | 14,22 | 14,92 | 16,42 | 16,41 |
| 01/04/2015 | 12,4 | 13,09 | 14,59 | 14,58 |

| | | | | |
|------------|-------|-------|-------|-------|
| 01/05/2015 | 10,45 | 11,02 | 12,25 | 12,24 |
| 01/06/2015 | 11,16 | 11,52 | 12,29 | 12,29 |
| 01/07/2015 | 10,07 | 10,45 | 11,27 | 11,26 |
| 01/08/2015 | 13,84 | 14,18 | 14,91 | 14,9 |
| 01/09/2015 | 14,28 | 14,72 | 15,68 | 15,68 |
| 01/10/2015 | 14,92 | 15,42 | 16,51 | 16,5 |
| 01/11/2015 | 14,89 | 15,52 | 16,89 | 16,88 |
| 01/12/2015 | 16,19 | 16,84 | 18,25 | 18,24 |
| 01/01/2016 | 15,55 | 16,31 | 17,94 | 17,93 |
| 01/02/2016 | 16,16 | 16,88 | 18,42 | 18,41 |
| 01/03/2016 | 13,93 | 14,59 | 15,99 | 15,99 |
| 01/04/2016 | 16,45 | 16,82 | 17,61 | 17,6 |
| 01/05/2016 | 11,27 | 11,62 | 12,38 | 12,37 |
| 01/06/2016 | 8,129 | 8,515 | 9,368 | 9,359 |
| 01/07/2016 | 11,56 | 11,8 | 12,32 | 12,31 |
| 01/08/2016 | 11,23 | 11,74 | 12,87 | 12,86 |
| 01/09/2016 | 11,01 | 11,64 | 13 | 12,99 |
| 01/10/2016 | 14,56 | 15,14 | 16,38 | 16,38 |
| 01/11/2016 | 14,02 | 14,67 | 16,05 | 16,04 |
| 01/12/2016 | 15,65 | 16,3 | 17,7 | 17,69 |
| 01/01/2017 | 14,89 | 15,68 | 17,38 | 17,37 |
| 01/02/2017 | 14,78 | 15,53 | 17,14 | 17,13 |
| 01/03/2017 | 14,08 | 14,77 | 16,25 | 16,24 |
| 01/04/2017 | 13,14 | 13,62 | 14,66 | 14,66 |
| 01/05/2017 | 13,66 | 13,94 | 14,54 | 14,54 |
| 01/06/2017 | 11,52 | 11,81 | 12,44 | 12,44 |
| 01/07/2017 | 11,55 | 11,91 | 12,69 | 12,69 |
| 01/08/2017 | 13,15 | 13,53 | 14,36 | 14,35 |
| 01/09/2017 | 14,27 | 14,72 | 15,69 | 15,68 |
| 01/10/2017 | 15,14 | 15,68 | 16,84 | 16,83 |
| 01/11/2017 | 15,49 | 16,11 | 17,44 | 17,43 |
| 01/12/2017 | 15,13 | 15,85 | 17,39 | 17,38 |
| 01/01/2018 | 13,99 | 14,73 | 16,32 | 16,31 |
| 01/02/2018 | 13,41 | 14,15 | 15,76 | 15,75 |
| 01/03/2018 | 14,46 | 15,03 | 16,26 | 16,25 |
| 01/04/2018 | 13,66 | 14,34 | 15,8 | 15,79 |
| 01/05/2018 | 12,52 | 13 | 14,06 | 14,05 |
| 01/06/2018 | 11,62 | 11,77 | 12,08 | 12,08 |
| 01/07/2018 | 13,49 | 13,51 | 13,53 | 13,53 |
| 01/08/2018 | 10,66 | 11,05 | 11,88 | 11,87 |

| | | | | |
|------------|-------|-------|-------|-------|
| 01/09/2018 | 14,3 | 14,8 | 15,88 | 15,87 |
| 01/10/2018 | 14,89 | 15,43 | 16,58 | 16,58 |
| 01/11/2018 | 15,97 | 16,5 | 17,64 | 17,63 |
| 01/12/2018 | 14,76 | 15,44 | 16,91 | 16,9 |
| 01/01/2019 | 15,18 | 15,9 | 17,45 | 17,44 |
| 01/02/2019 | 12,57 | 13,42 | 15,25 | 15,23 |
| 01/03/2019 | 13,52 | 14,2 | 15,67 | 15,66 |
| 01/04/2019 | 12,87 | 13,48 | 14,81 | 14,8 |
| 01/05/2019 | 12,65 | 12,99 | 13,73 | 13,73 |
| 01/06/2019 | 15,19 | 15,19 | 15,19 | 15,19 |
| 01/07/2019 | 11,37 | 11,61 | 12,12 | 12,12 |
| 01/08/2019 | 10,66 | 11,11 | 12,09 | 12,09 |
| 01/09/2019 | 13,82 | 14,28 | 15,28 | 15,27 |
| 01/10/2019 | 14,4 | 15,02 | 16,33 | 16,32 |
| 01/11/2019 | 15,75 | 16,45 | 17,94 | 17,93 |
| 01/12/2019 | 13,57 | 14,4 | 16,18 | 16,17 |
| 01/01/2020 | 14 | 14,87 | 16,78 | 16,76 |
| 01/02/2020 | 14,29 | 15,07 | 16,76 | 16,75 |
| 01/03/2020 | 14,45 | 15,17 | 16,71 | 16,71 |
| 01/04/2020 | 13,34 | 13,99 | 15,38 | 15,37 |
| 01/05/2020 | 11,67 | 12,18 | 13,31 | 13,3 |
| 01/06/2020 | 13,88 | 14,03 | 14,35 | 14,35 |
| 01/07/2020 | 11,31 | 11,59 | 12,2 | 12,2 |
| 01/08/2020 | 12,03 | 12,48 | 13,47 | 13,46 |
| 01/09/2020 | 13,67 | 14,13 | 15,12 | 15,12 |
| 01/10/2020 | 14,42 | 15,11 | 16,59 | 16,57 |
| 01/11/2020 | 13,36 | 14,16 | 15,9 | 15,89 |
| 01/12/2020 | 13,5 | 14,31 | 16,07 | 16,06 |

Fuente: Elaboración propia, en base a información de las grillas.

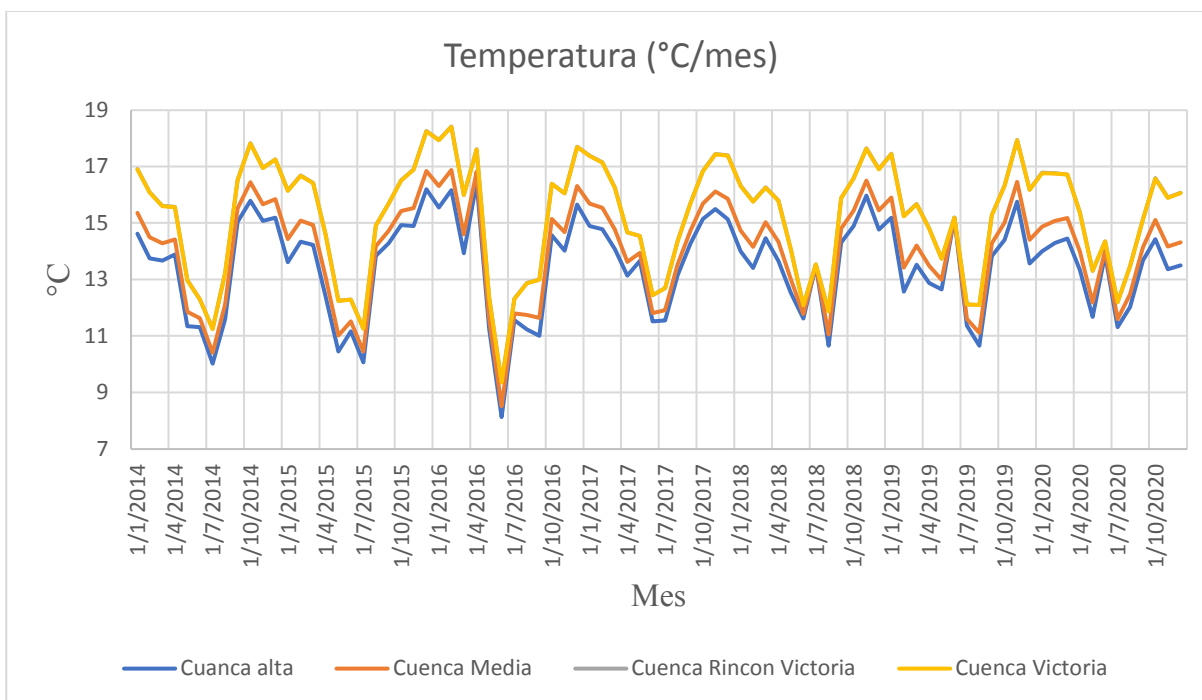


Figura 3.14. Temperatura en la Cuenca.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Excel.

Para la evapotranspiración se utilizó una serie de tiempo única para toda la cuenca. Se utilizó la referencia del modelo de Tolomosa.

Tabla 3.26. Datos de evapotranspiración.

| Fecha | Evapotranspiración (mm/mes) |
|------------|-----------------------------|
| 01/01/2014 | 123,122 |
| 01/02/2014 | 104,74 |
| 01/03/2014 | 102,432 |
| 01/04/2014 | 92,3623 |
| 01/05/2014 | 78,7567 |
| 01/06/2014 | 66,8249 |
| 01/07/2014 | 75,9897 |
| 01/08/2014 | 101,148 |
| 01/09/2014 | 130,806 |
| 01/10/2014 | 143,173 |
| 01/11/2014 | 128,778 |
| 01/12/2014 | 127,784 |
| 01/01/2015 | 121,06 |
| 01/02/2015 | 106,222 |
| 01/03/2015 | 106,379 |
| 01/04/2015 | 91,2539 |
| 01/05/2015 | 77,7598 |
| 01/06/2015 | 66,6146 |
| 01/07/2015 | 75,2376 |
| 01/08/2015 | 105,746 |
| 01/09/2015 | 126,426 |
| 01/10/2015 | 133,635 |
| 01/11/2015 | 128,009 |
| 01/12/2015 | 130,69 |
| 01/01/2016 | 124,502 |
| 01/02/2016 | 114,966 |
| 01/03/2016 | 103,134 |
| 01/04/2016 | 95,5895 |
| 01/05/2016 | 73,2201 |
| 01/06/2016 | 59,4103 |

| | |
|------------|---------|
| 01/07/2016 | 76,3367 |
| 01/08/2016 | 99,8351 |
| 01/09/2016 | 115,454 |
| 01/10/2016 | 132,533 |
| 01/11/2016 | 124,031 |
| 01/12/2016 | 129,935 |
| 01/01/2017 | 125,185 |
| 01/02/2017 | 105,629 |
| 01/03/2017 | 105,771 |
| 01/04/2017 | 87,6731 |
| 01/05/2017 | 80,2594 |
| 01/06/2017 | 65,9849 |
| 01/07/2017 | 79,529 |
| 01/08/2017 | 103,769 |
| 01/09/2017 | 124,445 |
| 01/10/2017 | 134,048 |
| 01/11/2017 | 130,318 |
| 01/12/2017 | 129,963 |
| 01/01/2018 | 119,685 |
| 01/02/2018 | 102,668 |
| 01/03/2018 | 103,341 |
| 01/04/2018 | 94,3097 |
| 01/05/2018 | 80,7622 |
| 01/06/2018 | 63,4844 |
| 01/07/2018 | 75,9897 |
| 01/08/2018 | 94,0242 |
| 01/09/2018 | 125,633 |
| 01/10/2018 | 133,635 |
| 01/11/2018 | 127,624 |
| 01/12/2018 | 125,605 |
| 01/01/2019 | 120,814 |
| 01/02/2019 | 104,382 |
| 01/03/2019 | 104,076 |

| | |
|------------|---------|
| 01/04/2019 | 90,067 |
| 01/05/2019 | 76,668 |
| 01/06/2019 | 64,069 |
| 01/07/2019 | 74,456 |
| 01/08/2019 | 97,749 |
| 01/09/2019 | 118,607 |
| 01/10/2019 | 132,694 |
| 01/11/2019 | 127,356 |
| 01/12/2019 | 126,112 |
| 01/01/2020 | 120,945 |
| 01/02/2020 | 104,317 |
| 01/03/2020 | 104,055 |
| 01/04/2020 | 90,018 |
| 01/05/2020 | 76,653 |
| 01/06/2020 | 64,075 |
| 01/07/2020 | 74,408 |
| 01/08/2020 | 97,73 |
| 01/09/2020 | 118,706 |
| 01/10/2020 | 132,723 |
| 01/11/2020 | 127,413 |
| 01/12/2020 | 126,128 |
| 01/01/2021 | 119,826 |
| 01/02/2021 | 104,152 |
| 01/03/2021 | 102,583 |
| 01/04/2021 | 89,2481 |
| 01/05/2021 | 77,2806 |
| 01/06/2021 | 67,2267 |
| 01/07/2021 | 75,6826 |
| 01/08/2021 | 97,0967 |
| 01/09/2021 | 128,326 |
| 01/10/2021 | 127,651 |
| 01/11/2021 | 129,023 |
| 01/12/2021 | 127,841 |

Fuente: Elaboración propia, en base a información de modelo de Tolomosa.

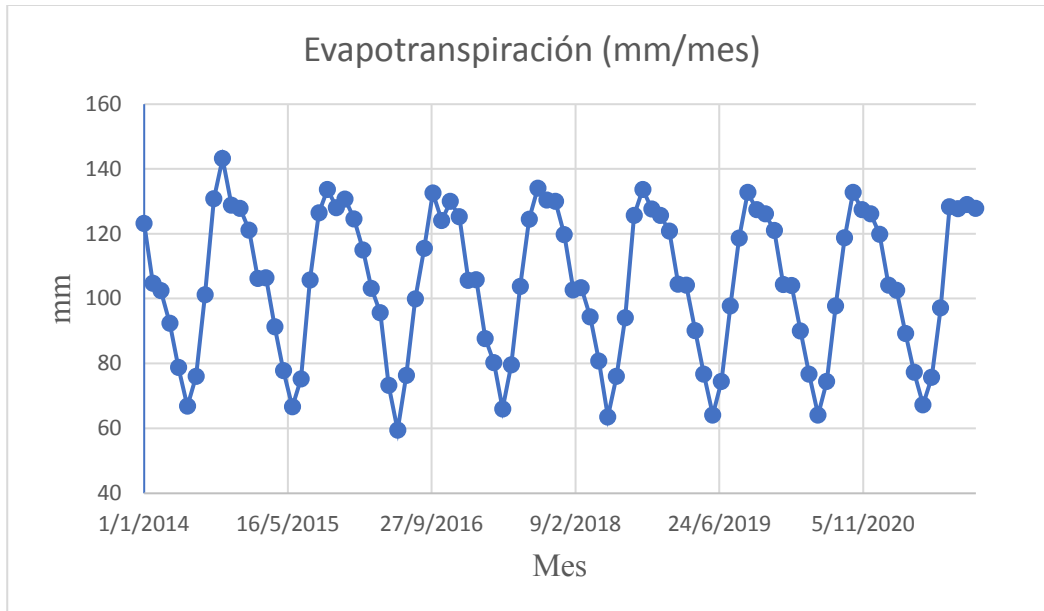


Figura 3.15. Evapotranspiración en la Cuenca.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Excel.

Para las demás variables se utilizó series de tiempo multianuales. Tal como recomiendan los modelos MTDR Guadalquivir y el modelo de Tolomosa.

Tabla 3.27. Datos Humedad relativa, Fracción de nubosidad y Vel. viento.

| Fecha | Humedad relativa (%) | Fracción de nubosidad | Velocidad del viento (m/s) |
|------------|----------------------|-----------------------|----------------------------|
| Enero | 67,74224 | 0,440217 | 1,431302 |
| Febrero | 69,70071 | 0,458484 | 1,366725 |
| Marzo | 69,68288 | 0,481530 | 1,363005 |
| Abril | 66,88282 | 0,562603 | 1,457236 |
| Mayo | 61,08851 | 0,633875 | 1,335003 |
| Junio | 55,46673 | 0,658370 | 1,096264 |
| Julio | 53,38914 | 0,716272 | 1,371889 |
| Agosto | 51,12418 | 0,711273 | 1,764186 |
| Septiembre | 51,50384 | 0,662278 | 2,232714 |
| Octubre | 55,86558 | 0,536951 | 2,205574 |
| Noviembre | 60,51170 | 0,477105 | 2,025257 |
| Diciembre | 64,23285 | 0,415188 | 1,721637 |

Fuente: Elaboración propia, con apoyo modelo MTDR.

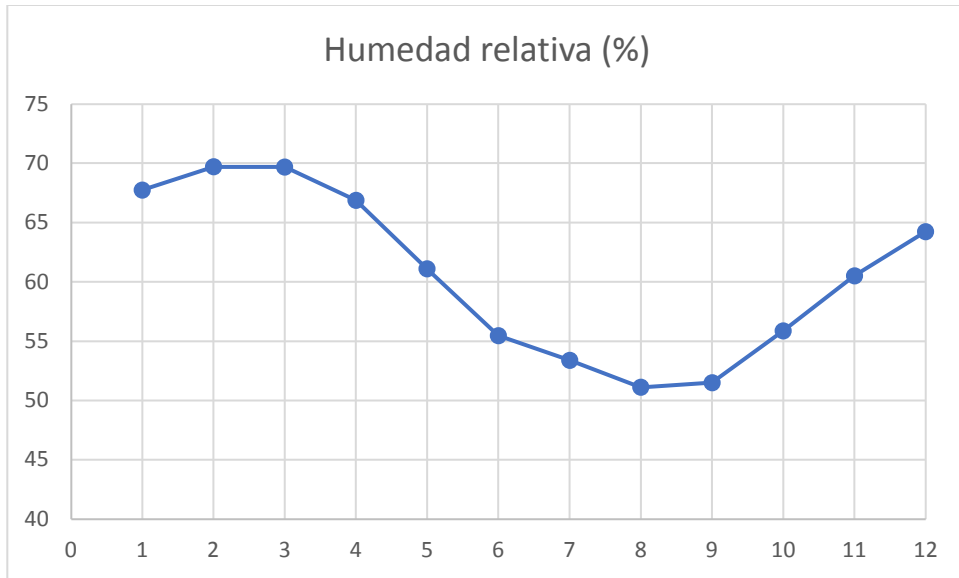


Figura 3.16. Humedad relativa.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Excel.

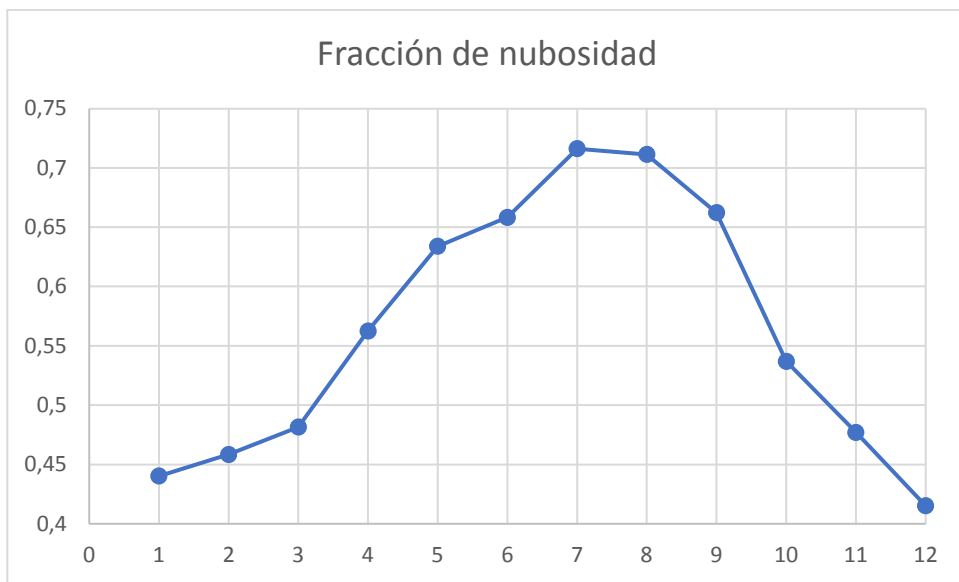


Figura 3.17. Fracción de nubosidad.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Excel.

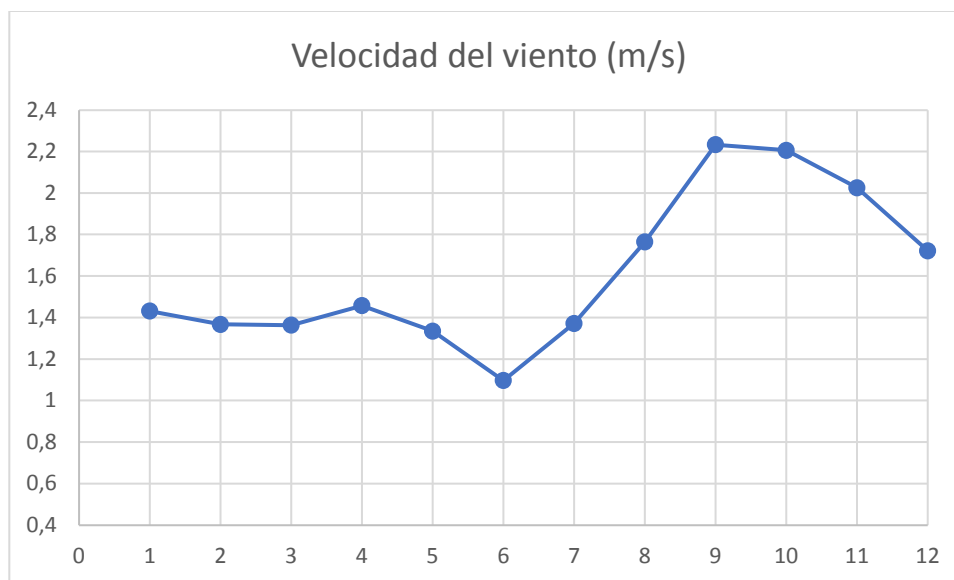


Figura 3.18. Velocidad de viento.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Excel.

- **Sistemas de Riego.**

Se crearon 3 sistemas de riego asociados a cultivos en 3 comunidades de la cuenca. De estos el sistema de riego R_Rincón Victoria se encuentra en la Cuenca Rincón Victoria y los sistemas de riego R_Cadillar y R_Victoria en la Cuenca Victoria.

Para las células de cultivo se utilizó las fichas comunales agropecuarias del 2013 para cada comunidad y el informe nacional de superficies cultivadas por año agrícola según tipo de cultivo desde 1984 a 2022. Se determinó el área específica para cada tipo de cultivo y su variación mensual para los años de estudio.

Tabla 3.28. Datos Cedula de Cultivo.

| Sistema de Riego | Cedula de cultivo | Área | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 |
|-------------------|-------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|
| R Cadilla | Maíz | Ha | 5,90 | 5,98 | 6,07 | 6,15 | 6,07 | 6,11 | 6,13 | 6,13 | 6,12 |
| R Cadilla | Papa | Ha | 4,30 | 4,40 | 4,49 | 4,55 | 4,41 | 4,44 | 4,5 | 4,6 | 5,57 |
| R Cadilla | Cebolla | Ha | 1,40 | 1,48 | 1,55 | 1,57 | 1,56 | 1,56 | 1,6 | 2,76 | 3,32 |
| R Cadilla | Arveja verde | Ha | 0,30 | 0,32 | 0,34 | 0,34 | 0,34 | 0,34 | 0,35 | 0,36 | 0,35 |
| R Cadilla | Avena | Ha | 0,30 | 0,29 | 0,35 | 0,3 | 0,28 | 0,27 | 0,27 | 0,29 | 0,29 |
| R Cadilla | Otros cultivos | Ha | 9,10 | 9,10 | 9,10 | 9,10 | 9,10 | 9,10 | 9,10 | 9,10 | 9,10 |
| R_Rincon Victoria | Maíz | Ha | 55,2 | 55,96 | 56,77 | 57,53 | 56,77 | 57,12 | 57,4 | 57,35 | 57,22 |
| R_Rincon Victoria | Papa | Ha | 34,80 | 35,58 | 36,37 | 36,8 | 35,72 | 35,93 | 36,4 | 37,24 | 45,07 |

| | | | | | | | | | | | |
|-------------------|----------------|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| R_Rincon Victoria | Arveja verde | Ha | 11,6 | 12,37 | 13,14 | 13,31 | 13,2 | 13,33 | 13,35 | 13,76 | 13,67 |
| R_Rincon Victoria | Alfalfa | Ha | 9,00 | 9,21 | 9,42 | 9,55 | 9,54 | 9,55 | 9,65 | 9,56 | 9,56 |
| R_Rincon Victoria | Cebolla | Ha | 1,30 | 1,37 | 1,44 | 1,46 | 1,45 | 1,44 | 1,49 | 2,56 | 3,08 |
| R_Rincon Victoria | Otros cultivos | Ha | 29,50 | 29,50 | 29,50 | 29,50 | 29,50 | 29,50 | 29,50 | 29,50 | 29,50 |
| R_Victoria | Papa | Ha | 12,5 | 12,78 | 13,06 | 13,22 | 12,83 | 12,91 | 13,08 | 13,38 | 16,19 |
| R_Victoria | Maíz | Ha | 12,1 | 12,27 | 12,44 | 12,61 | 12,44 | 12,52 | 12,58 | 12,57 | 12,54 |
| R_Victoria | Arveja verde | Ha | 5,60 | 5,97 | 6,34 | 6,42 | 6,37 | 6,43 | 6,44 | 6,64 | 6,6 |
| R_Victoria | Avena | Ha | 2,50 | 2,44 | 2,94 | 2,5 | 2,3 | 2,27 | 2,26 | 2,41 | 2,44 |
| R_Victoria | Maní | Ha | 1,00 | 1,03 | 1,05 | 1,07 | 1,07 | 1,07 | 1,08 | 1,07 | 1,07 |
| R_Victoria | Otros cultivos | Ha | 18,10 | 18,10 | 18,10 | 18,10 | 18,10 | 18,10 | 18,10 | 18,10 | 18,10 |

Fuente: Elaboración propia, con apoyo fichas comunales agropecuarias 2013 (INE).

Para los coeficientes de cultivo de cada tipo de cultivo se utilizó series de tiempo multianuales.

Tal como recomienda el modelo MTDR Guadalquivir.

Tabla 3.29. Datos Coeficientes de Cultivo (Kc).

| Fecha | Arveja | Avena | Cebolla | Maíz | Papa | Maní | Alfalfa | Otros cultivos |
|------------|--------|-------|---------|------|------|------|---------|----------------|
| Enero | 0,4 | 1,15 | 0 | 1,1 | 0,95 | 1,05 | 1,15 | 0,82 |
| Febrero | 0,77 | 0,96 | 0 | 1,05 | 0,87 | 0,82 | 0,66 | 0,73 |
| Marzo | 1,15 | 0,77 | 0,42 | 0 | 0,75 | 0,6 | 0,83 | 0,64 |
| Abril | 1,02 | 0,4 | 0,73 | 0 | 0 | 0 | 1,07 | 0,46 |
| Mayo | 0,9 | 0 | 1,05 | 0 | 0 | 0 | 0,66 | 0,37 |
| Junio | 0 | 0 | 0,92 | 0 | 0 | 0 | 0,82 | 0,24 |
| Julio | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,67 | 0,09 |
| Agosto | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,71 | 0,10 |
| Septiembre | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1,09 | 0,15 |
| Octubre | 0 | 0,42 | 0 | 0,36 | 0,33 | 0,31 | 1,13 | 0,36 |
| Noviembre | 0 | 0,78 | 0 | 0,75 | 0,74 | 0,68 | 0,7 | 0,52 |
| Diciembre | 0 | 0,96 | 0 | 1,15 | 1,15 | 0,86 | 1,14 | 0,75 |

Fuente: Elaboración propia, con apoyo modelos MTDR Guadalquivir.

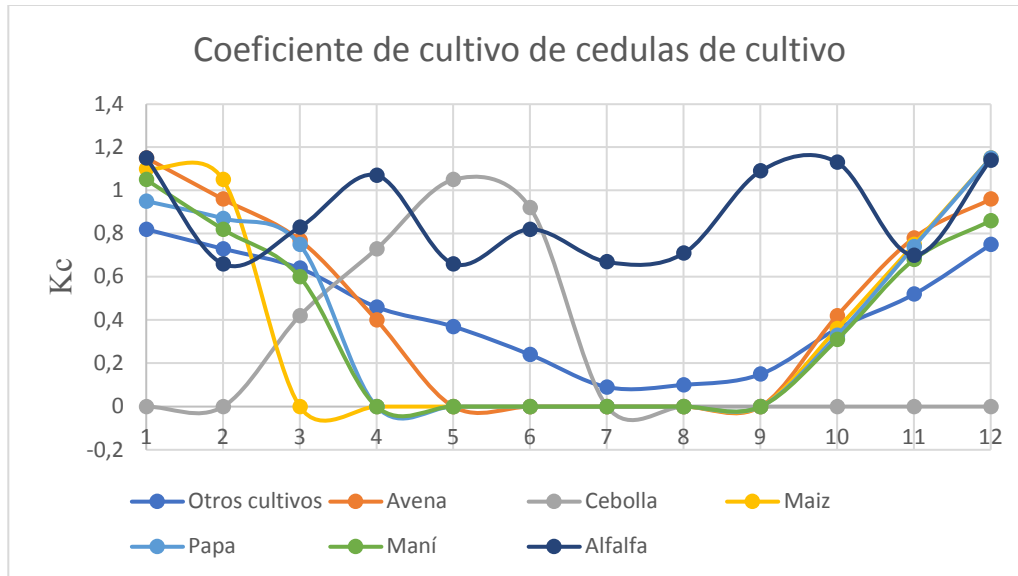


Figura 3.19. Coeficiente de cultivo de cedulas de cultivo.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Excel.

Finalmente se asumió una fracción de riego del 30% tal como recomienda el modelo MTDR Guadalquivir.

- **Poblaciones.**

Para las poblaciones se utilizó el CENSO 2012 en el cual se obtuvieron datos sobre las 3 comunidades de estudio. Para la proyección del crecimiento poblacional se estableció una tasa del 1.6% (Recomendación INE).

Finalmente se asumieron valores de tasa de consumo de agua y porcentaje de afluente consumido de 36.5 m³/persona y 80% respectivamente. Tal como recomienda el modelo MTDR Guadalquivir.

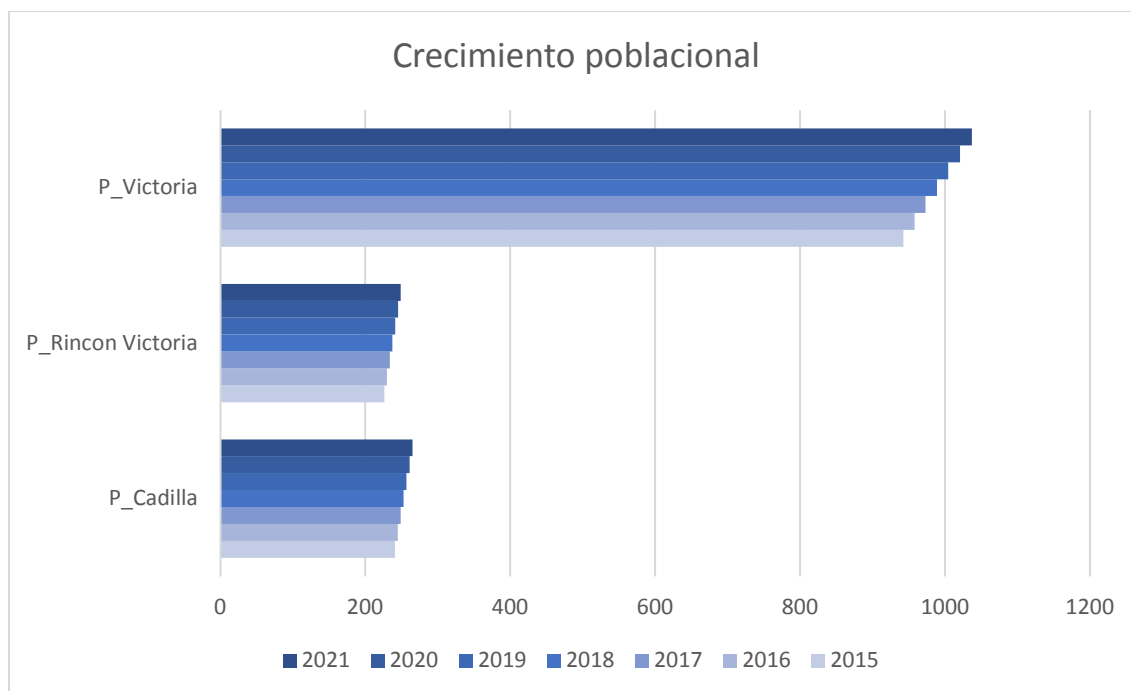


Figura 3.20. Crecimiento poblacional.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Excel.

3.4.4.3. Recursos y suministros.

- Toma IV

La Toma IV es un canal que extrae agua de la cuenca victoria en grandes cantidades. Se utilizo la siguiente información de control otorgada por COSAALT R.L.

Tabla 3.30. Datos Caudal de la toma.

| Fecha | Canal (m3/s) |
|------------|--------------|
| 01/01/2017 | 0,39656 |
| 01/02/2017 | 0,36934 |
| 01/03/2017 | 0,3934 |
| 01/04/2017 | 0,39994 |
| 01/05/2017 | 0,38352 |
| 01/06/2017 | 0,34715 |
| 01/07/2017 | 0,28956 |
| 01/08/2017 | 0,24526 |
| 01/09/2017 | 0,22063 |
| 01/10/2017 | 0,21275 |

| | |
|------------|---------|
| 01/11/2017 | 0,20914 |
| 01/12/2017 | 0,30446 |
| 01/01/2018 | 0,37913 |
| 01/02/2018 | 0,40044 |
| 01/03/2018 | 0,40044 |
| 01/04/2018 | 0,40044 |
| 01/05/2018 | 0,37863 |
| 01/06/2018 | 0,32402 |
| 01/07/2018 | 0,27304 |
| 01/08/2018 | 0,23978 |

| | |
|------------|---------|
| 01/09/2018 | 0,22063 |
| 01/10/2018 | 0,21637 |
| 01/11/2018 | 0,24296 |
| 01/12/2018 | 0,38678 |
| 01/01/2019 | 0,39656 |
| 01/02/2019 | 0,40044 |
| 01/03/2019 | 0,40044 |
| 01/04/2019 | 0,40044 |
| 01/05/2019 | 0,39875 |
| 01/06/2019 | 0,33256 |
| 01/07/2019 | 0,2638 |
| 01/08/2019 | 0,22304 |
| 01/09/2019 | 0,18824 |
| 01/10/2019 | 0,17979 |
| 01/11/2019 | 0,25405 |
| 01/12/2019 | 0,39215 |

| | |
|------------|---------|
| 01/01/2020 | 0,40044 |
| 01/02/2020 | 0,40044 |
| 01/03/2020 | 0,40044 |
| 01/04/2020 | 0,40044 |
| 01/05/2020 | 0,38629 |
| 01/06/2020 | 0,35793 |
| 01/07/2020 | 0,25188 |
| 01/08/2020 | 0,21715 |
| 01/09/2020 | 0,19509 |
| 01/10/2020 | 0,20991 |
| 01/11/2020 | 0,20329 |
| 01/12/2020 | 0,36575 |
| 01/01/2021 | 0,40044 |
| 01/02/2021 | 0,39877 |
| 01/03/2021 | 0,40044 |
| | |

Fuente: COSAALT R.L., 2022.

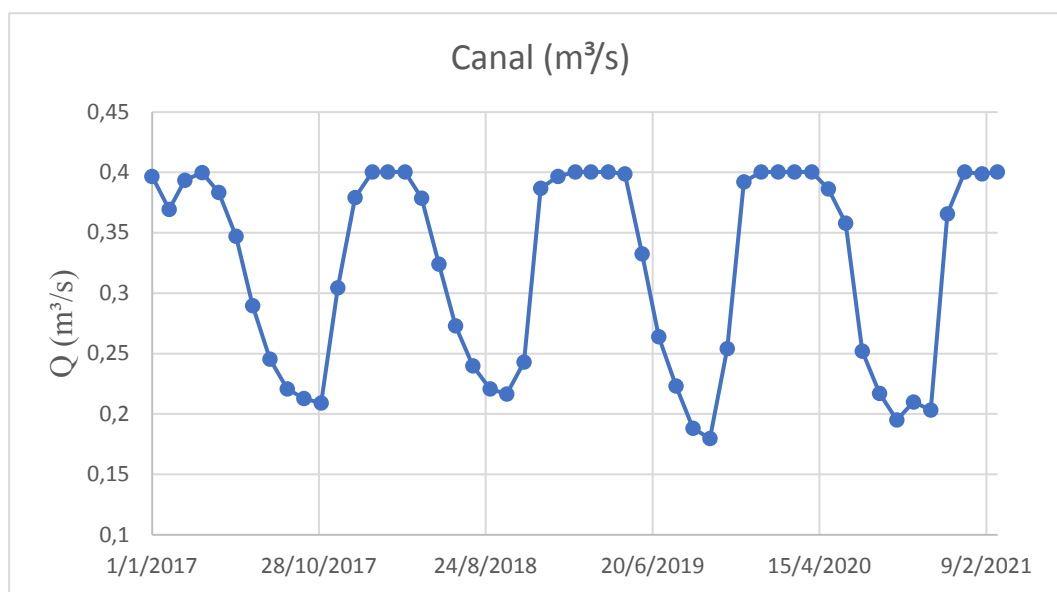


Figura 3.21. Caudal en el canal de COSAALT R.L.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de datos de COSAALT R.L.

- Mediciones Hidrométricas Rincón de la Victoria.

De la misma manera se recopiló datos monitoreados COSAALT R.L. de hidrometría del caudal del río.

Tabla 3.31. Mediciones hidrométricas.

| Fecha | Canal (m3/s) |
|------------|--------------|
| 01/09/2017 | 0,11222 |
| 01/03/2018 | 0,804 |
| 01/04/2018 | 0,237 |
| 01/05/2018 | 0,18 |
| 01/06/2018 | 0,14 |
| 01/07/2018 | 0,12 |
| 01/08/2018 | 0,09681 |
| 01/09/2018 | 0,08139 |
| 01/10/2018 | 0,0774 |
| 01/11/2018 | 0,54016 |
| 01/12/2018 | 0,38461 |
| 01/01/2019 | 2,21 |

| | |
|------------|---------|
| 01/02/2019 | 1,394 |
| 01/03/2019 | 0,66835 |
| 01/04/2019 | 0,313 |
| 01/05/2019 | 0,182 |
| 01/06/2019 | 0,132 |
| 01/07/2019 | 0,118 |
| 01/08/2019 | 0,08844 |
| 01/09/2019 | 0,078 |
| 01/10/2019 | 0,323 |
| 01/11/2019 | 0,564 |
| 01/12/2019 | 1,133 |
| 01/01/2020 | 2,374 |

Fuente: COSAALT R.L., 2022.

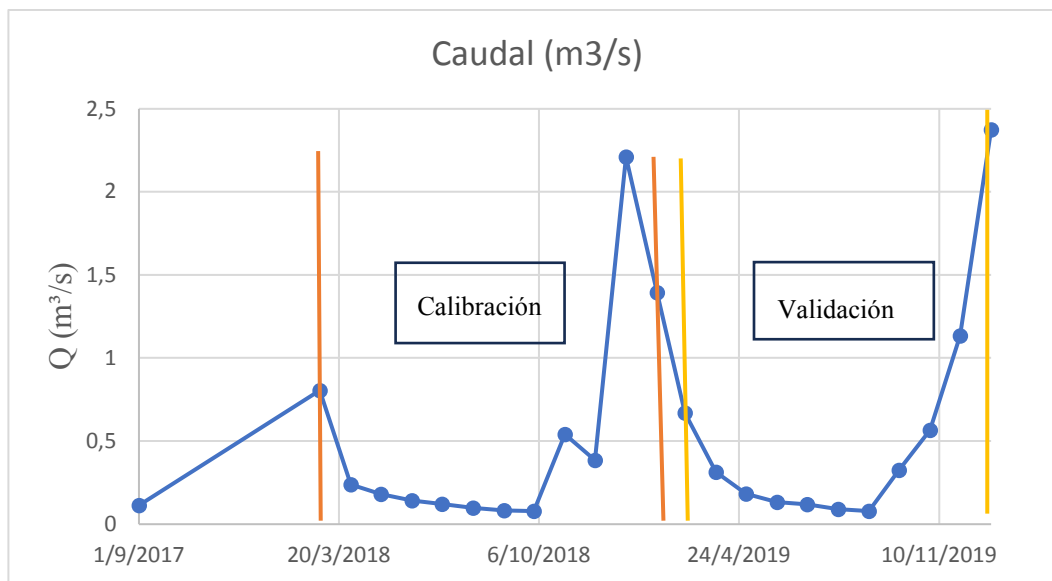


Figura 3.22. Caudal medido.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de datos de COSAALT R.L.

3.4.5. Modelo WEAP La Victoria.

3.4.5.1. Cuentas corrientes y reference.

El escenario de cuentas corrientes y reference tiene la misma programación. Ambos casos cuentan con el método de humedad de suelo. Se los considero como un modelo hidrológico en el que no

se tiene la influencia del incendio de 2017, por lo que las superficies y coberturas de uso de suelo se mantiene constantes con el tiempo.

Sin embargo, por su parte se simulo el incremento de áreas de cultivo, el crecimiento poblacional y la variabilidad climática para su funcionamiento.

3.4.5.2. Escenario de Incendios.

En el caso del escenario de incendios, este un producto resultante del primer escenario de modelación sin influencia del incendio, en el que se aplicó la variación de la cobertura de uso de suelo en series temporales para toda la secuencia de estudio. El objetivo fue determinar como el incendio cambia la disponibilidad de agua superficial, la escorrentía y la dinámica hidrológica de la cuenca Victoria.

3.4.5.3. Calibración del Modelo.

La calibración del modelo se vio reflejada en un primer escenario (Reference) en el que se ajustaron los componentes de modelación del método de humedad del suelo y tomando en cuenta valores de la bibliografía como Espejo 2016 o Gonzales para valores de RRF y f. Una vez ajustados los parámetros se procedió a correr el modelo bajo escenarios con incendios (Incendio) y verificar la calibración.

Tabla 3.32. Calibración del modelo.

| | | Modelado Reference | Modelado Incendio | Observado | Variación Calibración (Incendio/Reference) |
|--------------------|-----------------|-------------------------------|------------------------------|------------------|---|
| Calibración | Mar-2018 | 0,964779 | 1,03721 | 0,804 | 0,072431 |
| | Abr 2018 | 0,27222 | 0,292465 | 0,237 | 0,020245 |
| | May-2018 | 0,118337 | 0,127218 | 0,18 | 0,008881 |
| | Jun-2018 | 0,0767852 | 0,0825407 | 0,14 | 0,0057555 |
| | Jul-2018 | 0,046042 | 0,0495214 | 0,12 | 0,0034794 |
| | Ago-2018 | 0,0432765 | 0,0467157 | 0,09681 | 0,0034392 |
| | Sep-2018 | 0,117477 | 0,127156 | 0,08139 | 0,009679 |
| | Oct-2018 | 0,329854 | 0,355828 | 0,0774 | 0,025974 |
| | Nov-2018 | 0,364397 | 0,392263 | 0,54016 | 0,027866 |
| | Dic-2018 | 0,936906 | 1,00757 | 0,38461 | 0,070664 |
| | Ene-2019 | 0,79281 | 0,852868 | 2,21 | 0,060058 |
| | Feb-2019 | 0,992587 | 1,06781 | 1,34593 | 0,075223 |

Fuente: Elaboración propia, con ayuda Software WEAP.

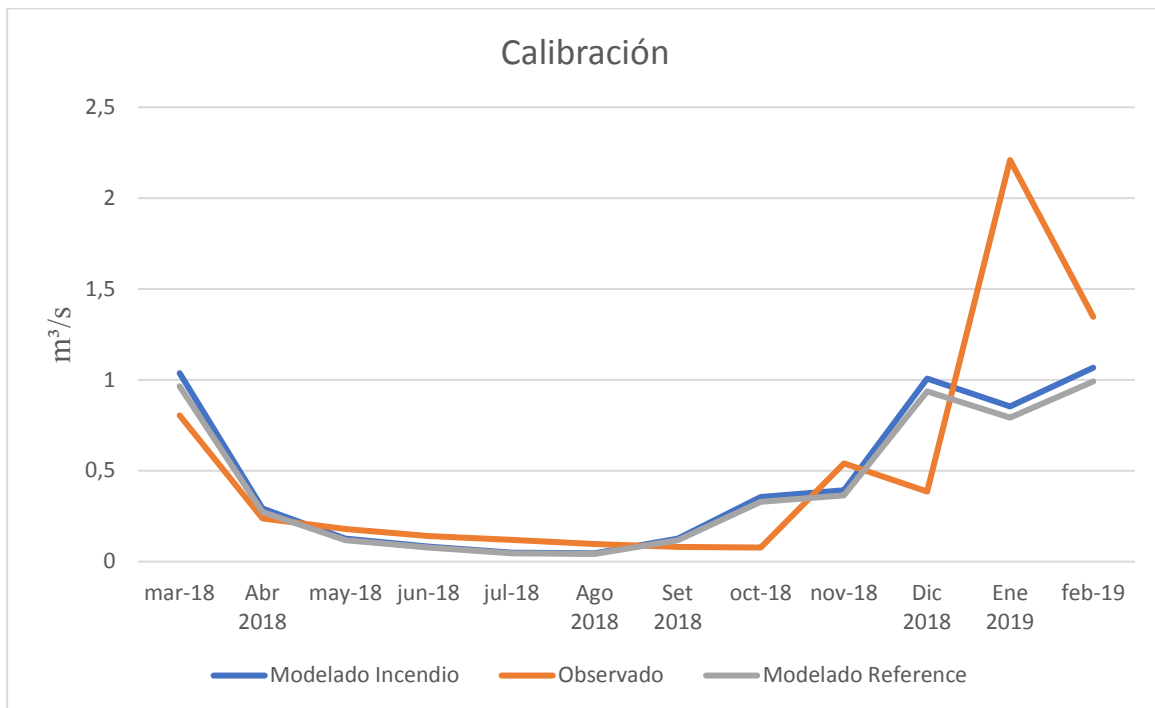


Figura 3.23. Calibración del modelo.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Excel.

En el mes de enero presenta un pico esto se debe a que hubo un evento extremo y la Institución COSAALT RL. Debió tomar la medición de dicho evento.

Los estadísticos de Calibración dieron los siguientes resultados:

Tabla 3.33. Estadísticos de calibración del modelo.

| Indicador | Reference | Incendio |
|-----------|-----------|-----------|
| NSE | 0,45 | 0,47 |
| KGE | 0,46 | 0,51 |
| NRMSE | 89% | 88% |
| RMSE | 0,46 m3/s | 0,45 m3/s |
| PBIAS | -19% | -13% |
| r | 0,7 | 0,7 |
| r2 | 0,49 | 0,49 |

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de resultados de software WEAP.

3.4.5.4. Validación del Modelo.

En cuanto a la validación se analizó el comportamiento del modelo en base a los ajustes realizados en la sección anterior con el objetivo de identificar indicadores similares o mejor ajustados.

Tabla 3.34. Validación del modelo.

| Validación | | Modelado Reference | Modelado Incendio | Observado | Variación Validación (Incendio/Reference) |
|------------|----------|--------------------|-------------------|-----------|---|
| | Mar-2019 | 0,49227 | 0,515365 | 0,66835 | 0,023095 |
| | Abr-2019 | 0,409152 | 0,428774 | 0,313 | 0,019622 |
| | May-2019 | 0,0977327 | 0,102326 | 0,182 | 0,0045933 |
| | Jun-2019 | 0,0446658 | 0,0467338 | 0,132 | 0,002068 |
| | Jul-2019 | 0,0309725 | 0,0324801 | 0,118 | 0,0015076 |
| | Ago-2019 | 0,0347834 | 0,0365712 | 0,08844 | 0,0017878 |
| | Set-2019 | 0,0189875 | 0,0199109 | 0,078 | 0,0009234 |
| | Oct-2019 | 0,125339 | 0,13185 | 0,323 | 0,006511 |
| | Nov-2019 | 0,50017 | 0,523998 | 0,564 | 0,023828 |
| | Dic-2019 | 0,846011 | 0,884414 | 1,133 | 0,038403 |
| | Ene-2020 | 1,43625 | 1,50099 | 2,374 | 0,06474 |
| | Feb-2020 | 1,19934 | 1,25304 | | 0,0537 |

Fuente: Elaboración propia, con ayuda Software WEAP.

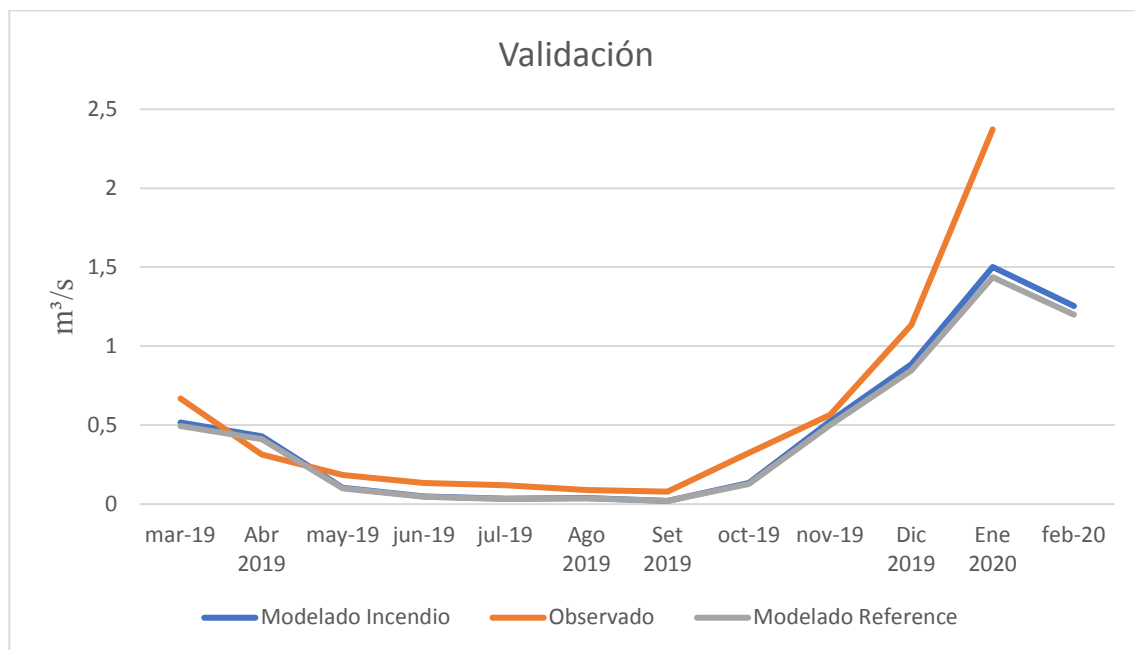


Figura 3.24. Validación del modelo.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Excel.

Los estadísticos de Validación dieron los siguientes resultados:

Tabla 3.35. Estadísticos de validación del modelo.

| Indicador | Reference | Incendio |
|------------------|------------------------|------------------------|
| NSE | 0,77 | 0,8 |
| KGE | 0,52 | 0,56 |
| NRMSE | 58% | 53% |
| RMSE | 0,31 m ³ /s | 0,29 m ³ /s |
| PBIAS | -32% | -29% |
| r | 0,98 | 0,98 |
| r ² | 0,95 | 0,95 |

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de resultados de software WEAP.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS OBTENIDOS

4. RESULTADOS.

4.1. Demanda de Agua poblacional y para riego.

La demanda de agua es básicamente por parte de las 3 comunidades y los 3 sistemas de riego.

Tabla 4.1. Demanda agua poblacional y para riego.

| UH (m3) | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Set | Oct | Nov | Dic | Ene | Feb |
|------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Cuenca Alta | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Cuenca Media | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Cuenca Rincón Victoria | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Cuenca Victoria | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| P_Cadilla | 784,0 28 | 758,7 37 | 784,0 28 | 758,7 37 | 784,0 28 | 784,0 28 | 758,7 37 | 784,0 28 | 758,7 37 | 784,0 28 | 784,0 28 | 715,3 66 |
| P_Rincon Victoria | 736,3 04 | 712,5 53 | 736,3 04 | 712,5 53 | 736,3 04 | 736,3 04 | 712,5 53 | 736,3 04 | 712,5 53 | 736,3 04 | 736,3 04 | 671,8 22 |
| P_Victoria | 3064, 53 | 2965, 67 | 3064, 53 | 2965, 67 | 3064, 53 | 3064, 53 | 2965, 67 | 3064, 53 | 2965, 67 | 3064, 53 | 3064, 53 | 2796, 15 |
| R_Cadilla | 4105, 53 | 4976, 22 | 1020 6,4 | 6023, 69 | 725,3 86 | 1824, 76 | 1513, 17 | 3549, 19 | 1736 9,6 | 1851 2,6 | 1794 6 | 9978, 97 |
| R_Rincón Victoria | 4777 5,9 | 6078 5,4 | 6396 4,4 | 2724 8,2 | 1855 4,5 | 2831 0,1 | 4532 6,3 | 5897 4,7 | 1549 08 | 1718 52 | 1476 27 | 7584 5,7 |
| R_Victoria | 2287 3,6 | 2661 0,6 | 3035 6,6 | 9650, 94 | 4388, 38 | 5744, 61 | 7775, 97 | 1245 1,7 | 5462 9,6 | 5252 7,1 | 5016 7,3 | 2589 9,2 |

Fuente: Elaboración propia, con apoyo software WEAP.

Nota: P = Población; R= Riego

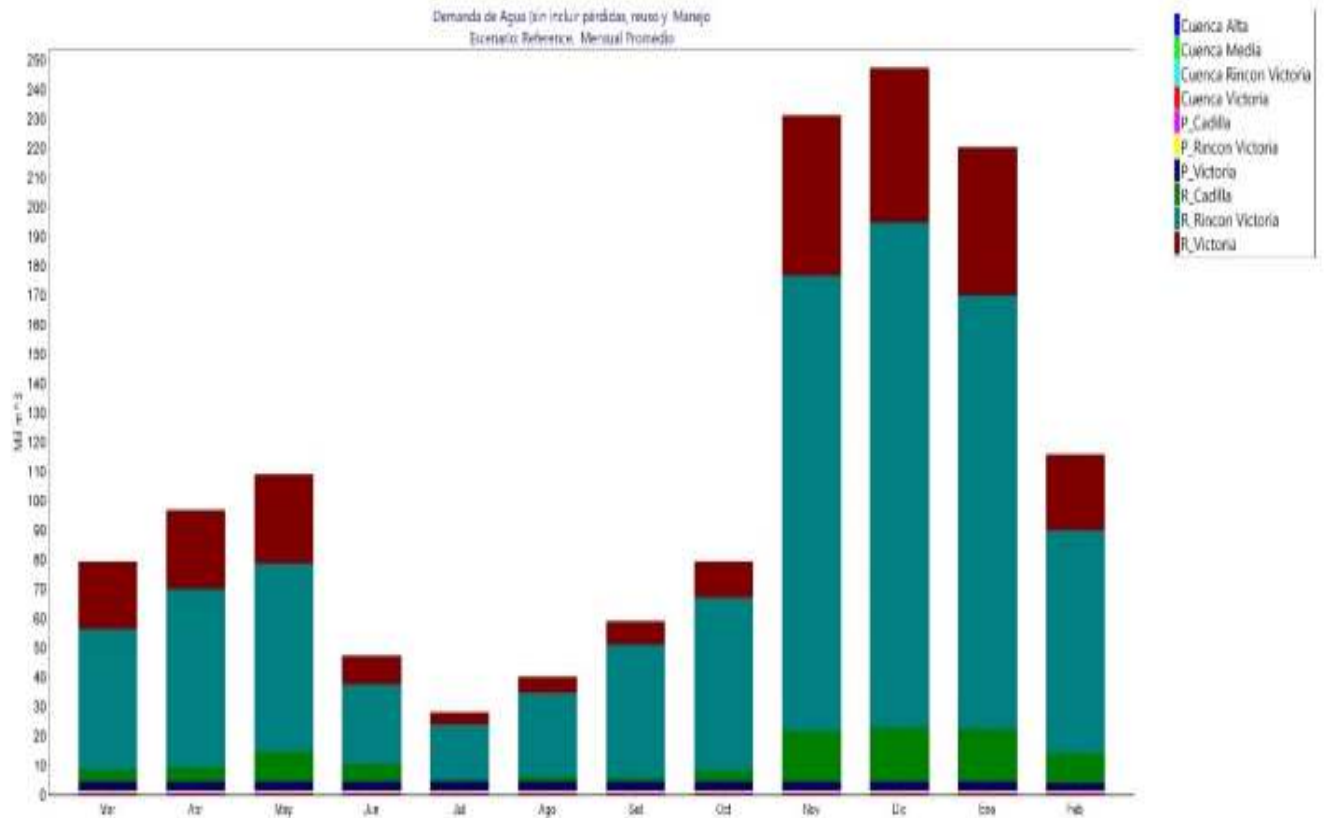


Figura 4.1. Demanda agua poblacional y para riego.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de resultados de software WEAP.

Como se puede apreciar en la figura 4.1. el sistema de riego de la cuenca Rincón de la Victoria es el que tiene mayor demanda de agua, seguido del sistema de riego de la cuenca Victoria.

La demanda de agua será la misma para ambos escenarios ya que esta la define el consumo de las comunidades y el requerimiento para riego. Variables que son similares para cada escenario.

4.2. Humedad del Suelo.

La humedad del suelo se mantiene en rangos aceptables de modelación, este es otro parámetro de calibración que debe ser controlado minuciosamente al momento de calibrar el modelo hidrológico. La humedad del suelo se mantiene entre un rango con un máximo de 88,07% y un mínimo de 1,62%.

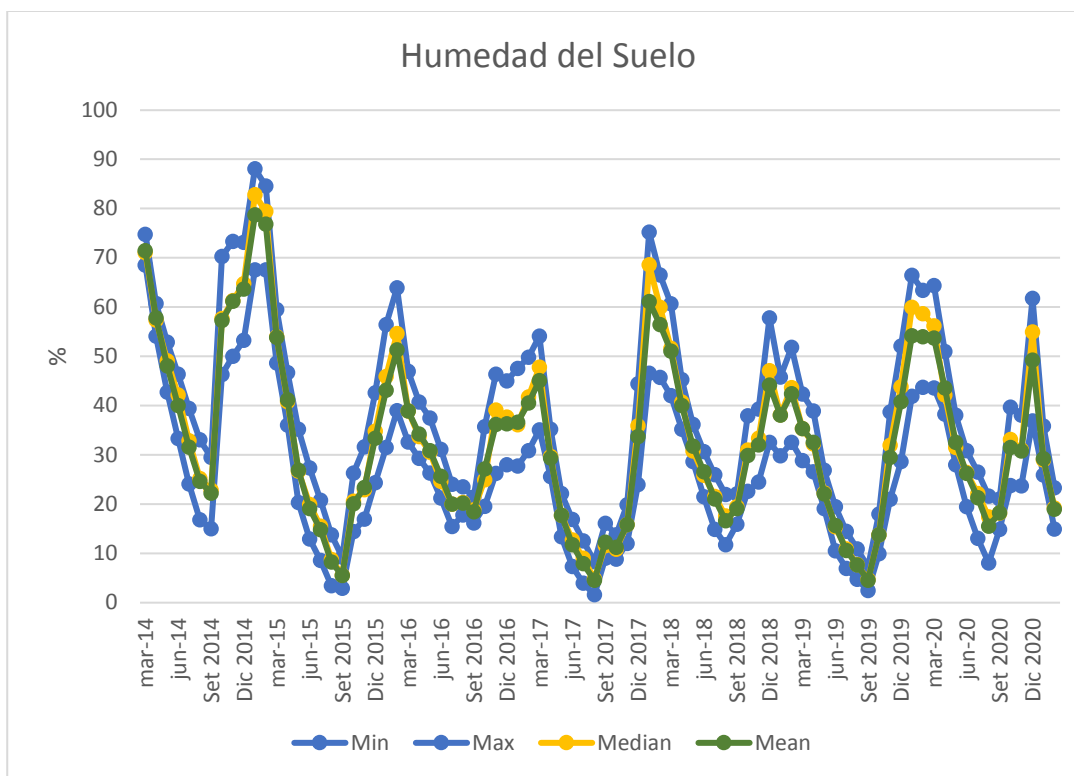


Figura 4.2. Humedad del Suelo.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de software WEAP.

4.3. Hidrograma de la cuenca.

- Reference

Tabla 4.2. Hidrograma reference.

| Variable | Reference | | | | | | | |
|----------|-------------------------------------|-------------------------|--------------------|------------|------------------------------------|-------------|---------------|---------|
| | Disminución de la Humedad del Suelo | Escorrentía Superficial | Evapotranspiración | Flujo Base | Incremento de la Humedad del Suelo | Inter Flujo | Precipitación | Riego |
| Mar | 1112464 | -4321040 | -3329270 | -166769 | -128652 | -652690 | 7544023 | 74755 |
| Abr | 1434663 | -1456500 | -2383510 | -167215 | 0 | -459366 | 3026424 | 92372,3 |
| May | 1460617 | -324558 | -1608120 | -155434 | 0 | -291064 | 897854 | 104527 |
| Jun | 1030006 | -145133 | -1060110 | -138339 | 0 | -186747 | 492339 | 42922,8 |
| Jul | 903119 | -82315,6 | -905565 | -121430 | 0 | -121525 | 324367 | 23668,2 |
| Ago | 755612 | -104986 | -855223 | -106142 | -7334,99 | 77656,2 | 388572 | 35879,5 |
| Set | 323542 | -283791 | -957006 | -93204,2 | -219786 | 61700,3 | 1281805 | 54615,5 |
| Oct | 27160,2 | -1255500 | -1758320 | -84843,1 | -1713090 | -154369 | 4985008 | 74975,6 |
| Nov | 20191,5 | -1895550 | -2456470 | -85298,2 | -829172 | -275750 | 5511016 | 226907 |
| Dic | 13446,3 | -4148140 | -3268010 | -91368,1 | -1563050 | -387767 | 9464636 | 242892 |

| | | | | | | | | |
|------------|---------|-----------|-----------|---------|----------|---------|----------|---------|
| Ene | 487742 | -6120350 | -3668540 | -105138 | -1501990 | -547363 | 11596848 | 145515 |
| Feb | 270901 | -5153750 | -3205900 | -123170 | -412276 | -594499 | 9350701 | 37452 |
| Sum | 7839463 | -25291600 | -25456000 | 1438350 | -6375350 | 3810500 | 54863592 | 1156482 |

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de resultados de software WEAP.

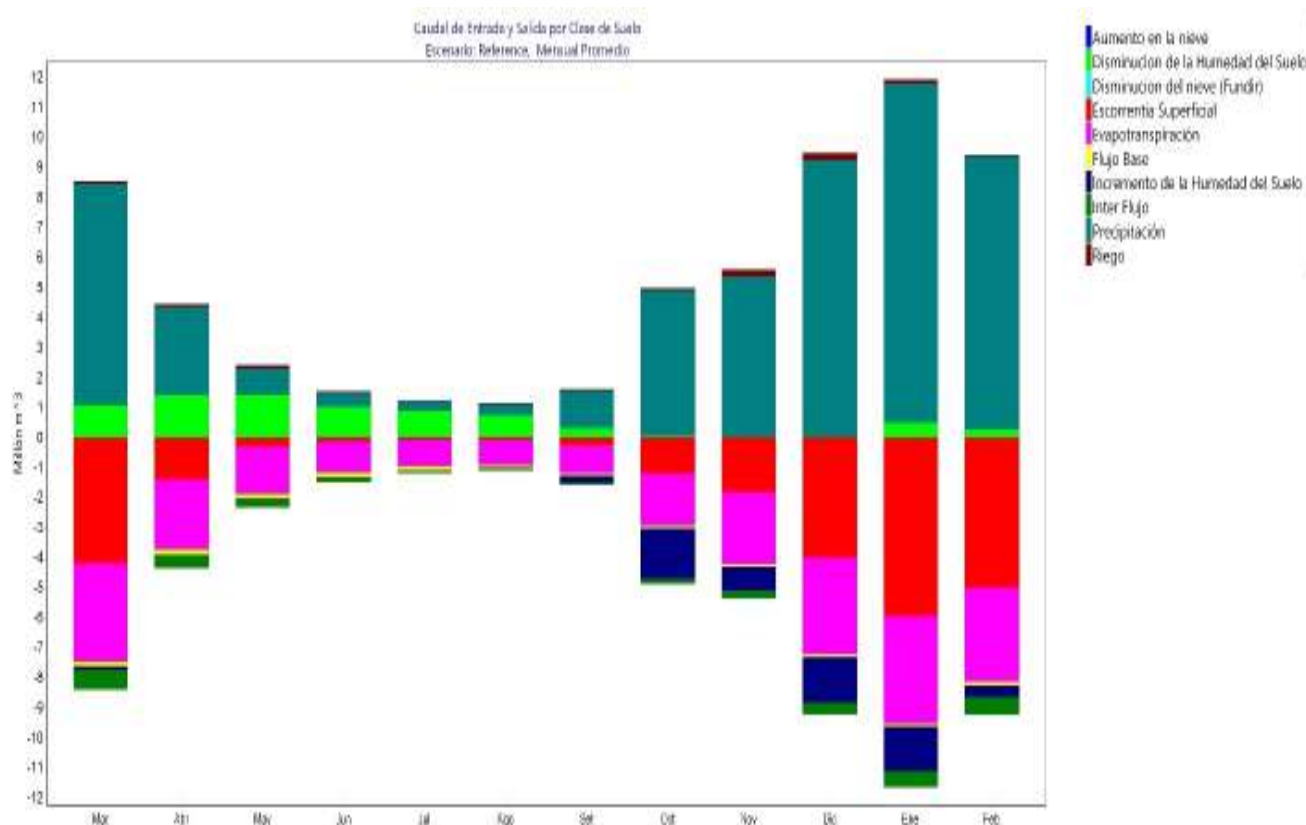


Figura 4.3. Caudal de entrada y salida por clase de suelo, escenario referencia.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de software WEAP.

- Incendio

Tabla 4.3. Hidrograma Incendio.

| Variable | Incendio | | | | | | | |
|------------|-------------------------------------|-------------------------|--------------------|------------|------------------------------------|-------------|---------------|---------|
| | Disminucion de la Humedad del Suelo | Escorrentia Superficial | Evapotranspiración | Flujo Base | Incremento de la Humedad del Suelo | Inter Flujo | Precipitación | Riego |
| Mar | 1077409 | -4195880 | -3263870 | -165724 | -126215 | -637695 | 7370008 | 74755 |
| Abr | 1398548 | -1399520 | -2332640 | -166158 | 0 | -447746 | 2941935 | 92372,3 |
| May | 1420814 | -310536 | -1571330 | -154388 | 0 | -282761 | 877437 | 104527 |
| Jun | 999799 | -138963 | -1032880 | -137339 | 0 | -180819 | 482188 | 42922,8 |

| | | | | | | | | |
|------------|---------|-----------|-----------|----------|----------|---------|----------|---------|
| Jul | 873996 | -78676.2 | -879015 | -120480 | 0 | -117210 | 318005 | 23668,2 |
| Ago | 735853 | -91664.8 | -827484 | -105242 | -7311.1 | 74468.2 | 363128 | 35879,5 |
| Set | 307215 | -269121 | -928067 | -92359.1 | -217943 | 59113.5 | 1249230 | 54615,5 |
| Oct | 26952,2 | -1205460 | -1724900 | -84053.3 | -1696710 | -151622 | 4881884 | 74975,6 |
| Nov | 20149,3 | -1813450 | -2416440 | -84585.1 | -794429 | -271917 | 5349740 | 226907 |
| Dic | 14507,3 | -4012930 | -3214580 | -90727 | -1520360 | -381336 | 9225333 | 242892 |
| Ene | 480478 | -5943060 | -3594770 | -104506 | -1469910 | -538497 | 11311880 | 144525 |
| Feb | 266579 | -4992760 | -3140080 | -122543 | -397509 | -584699 | 9103206 | 36901,8 |
| Sum | 7622300 | -24452000 | -24926000 | 1428100 | -6230400 | 3727880 | 53473975 | 1154943 |

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de resultados de software WEAP.

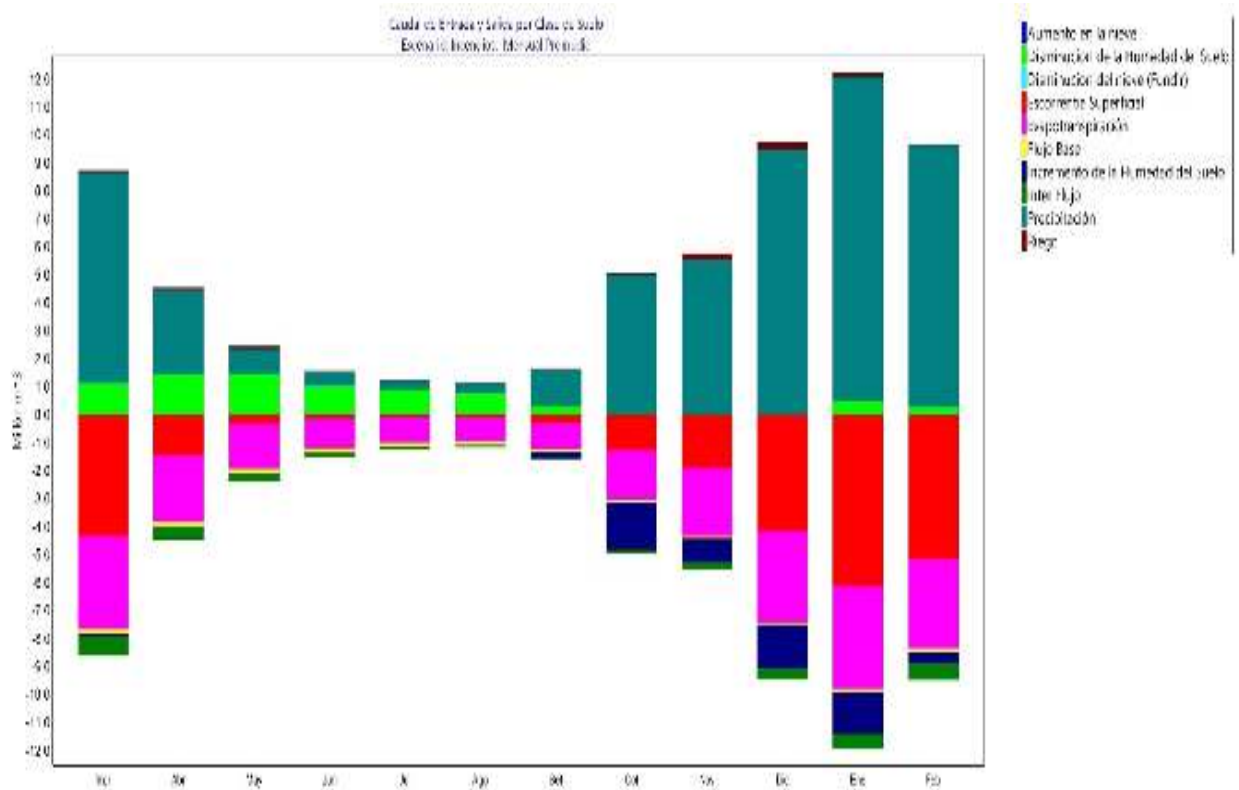


Figura 4.4. Caudal de entrada y salida por clase de suelo, escenario incendios.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de software WEAP.

En cuanto a la oferta de agua se presenta una recarga del 86% por precipitación como el principal medio de recarga.

Oferta de agua (2016-2020)

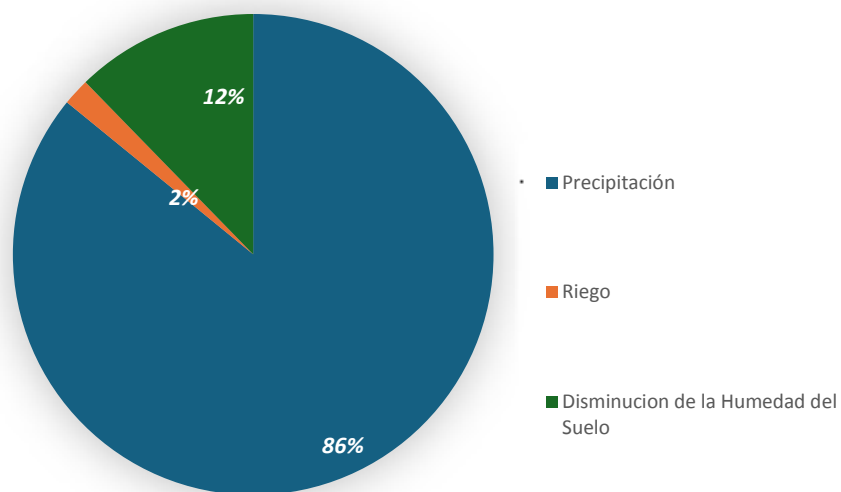


Figura 4.5. Oferta de agua.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de software WEAP.

En cuanto a la descarga de la cuenca Victoria el 82% de esta por escorrentía superficial (41%) y evapotranspiración (41%).

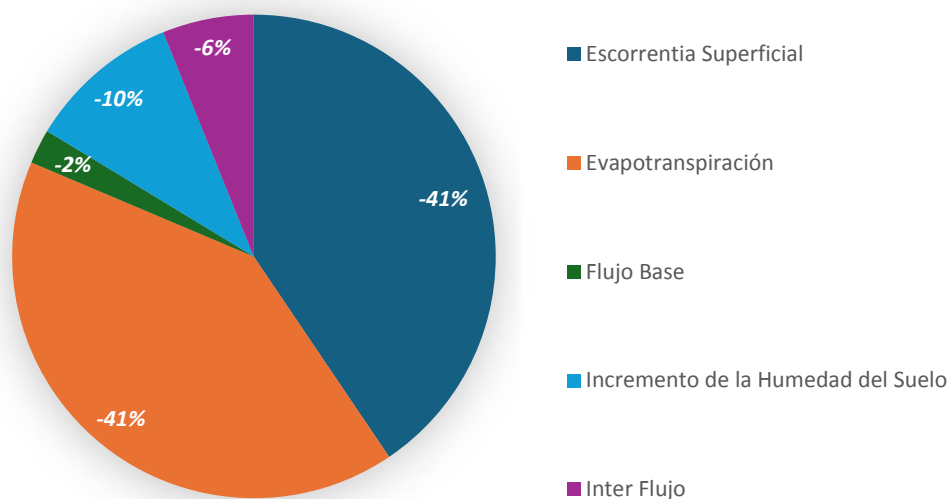


Figura 4.6. Demanda de agua.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de software WEAP.

En términos generales la dinámica comparada entre un escenario con Incendios y uno sin incendios no altera notablemente el balance del hidrograma en cuanto al aporte total, sin embargo, si se analiza específicamente cada flujo existe una diferencia apreciable.

Tabla 4.4. Relación Incendio/Reference.

| Relación Incendio/Reference | Diferencia absoluta (Millones m³/año) |
|--|---|
| Disminución de la Humedad del Suelo | 0,217163 |
| Escorrentía Superficial | 0,8396 |
| Evapotranspiración | 0,53 |
| Flujo Base | 0,01025 |
| Incremento de la Humedad del Suelo | 0,14495 |
| Inter Flujo | 0,08262 |
| Precipitación | 1,389617 |
| Riego | 0,001539 |

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de resultados de software WEAP.

4.4. Calibración multitemporal del incendio.

El incendio tuvo una precisa calibración en la mayor parte de los meses de estudio. Entre los meses de Marzo y Diciembre el comportamiento del modelo presenta una correlación muy alta, pero presenta problemas en los meses de Enero y Febrero. Se estima que estos problemas pueden deberse a las condiciones de medición de caudal que tiene COSAALT R.L. al realizar una medida de caudal al mes.

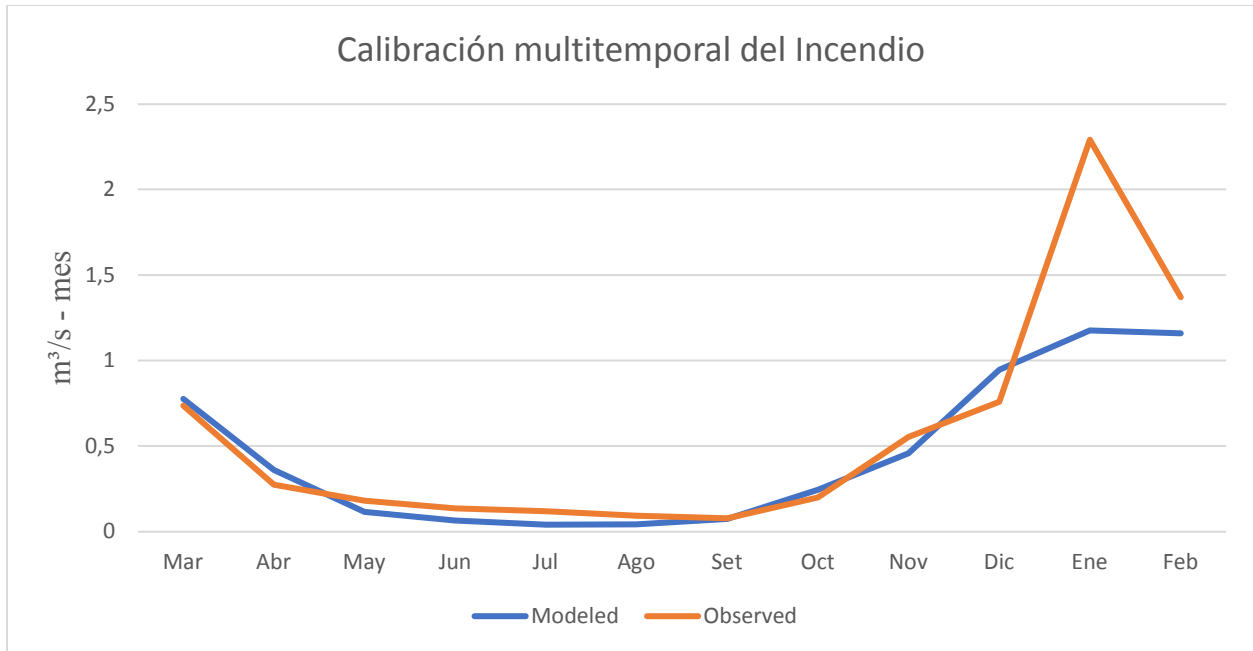


Figura 4.7. Calibración multitemporal del incendio.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de software WEAP.

En el mes de enero presenta un pico esto se debe a que hubo un evento extremo y la Institución COSAALT RL. Debió tomar la medición de dicho evento.

Sin embargo, los estadísticos de control son muy prometedores.

Tabla 4.5. Estadísticos de calibración multitemporal del incendio.

| Indicador | Reference | Incendio |
|-----------|-----------|-----------|
| NSE | 0,69 | 0,72 |
| KGE | 0,55 | 0,6 |
| NRMSE | 63% | 59% |
| RMSE | 0,36 m3/s | 0,34 m3/s |
| PBIAS | -24% | -20% |
| r | 0,9 | 0,9 |
| r2 | 0,81 | 0,81 |

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de resultados de software WEAP.

CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL INCENDIO SOBRE LA ESCORRENTÍA

5. Caudal.

- Punto Control Cosalt (2016 – 2017)

El análisis previo al incendio proporciona una identificación del comportamiento regular del caudal en la cuenca Victoria sin la influencia del incendio. En este caso identificamos el volumen multianual para el análisis.

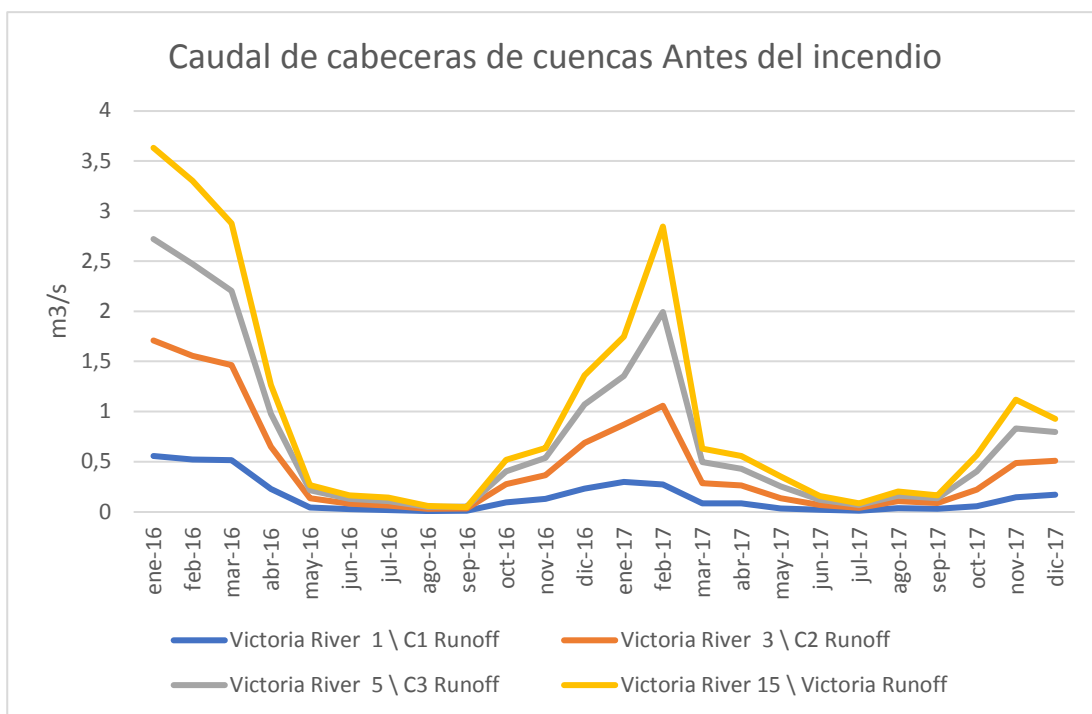


Figura 5.1. Caudal de cabeceras de cuencas antes del incendio.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de software WEAP.

Tabla 5.1. Volumen punto de control obra toma Cosaalt.

| AÑO | Volumen Hm3 | Descripción |
|------|-------------|---------------|
| 2016 | 13,1912 | Pre incendio |
| 2017 | 15,2207 | Pre incendio |
| 2018 | 21,3016 | Post incendio |
| 2019 | 14,3787 | Post incendio |

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de resultados de software WEAP.

Como se puede observar en la Tabla 5.1 el volumen pre incendio es de 28,4120 Hm³ en el escenario pre incendio 2016-2017. En cuanto a post incendio es de 35,6802 Hm³ 2018-2019. Lo que genera un aumento de Volumen de 7.2683 Hm³ en la escorrentía superficial.

- En el incendio

En el incendio se estudió el comportamiento del caudal en los 2 escenarios: uno sin influencia inmediata del incendio y otro con la influencia inmediata del incendio. El cambio más importante se lo encuentra en el incremento del caudal producto del incendio en ambos años con un rango entre 0.072 a 0.023 m³/s en temporada húmeda y un rango entre 0.001 a 0.009 m³/s en temporada seca.

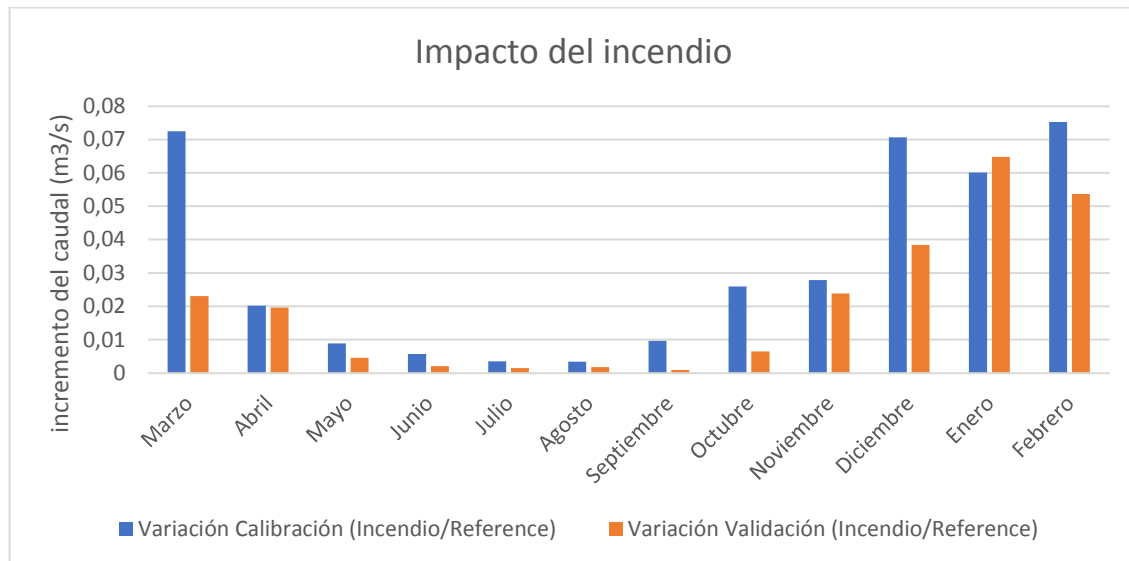


Figura 5.2. Impacto del incendio en el caudal.

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de software WEAP.

Tabla 5.2. Caudal y Volumen promedio Ago 2017- Sep 2017.

| Ago 2017 - Sep 2017 | | Caudal multianual (m3/s) | | | | | Volumen multianual (Hm3) | | | | |
|--------------------------|------------------------------|--------------------------|------------------------------------|---------|-----------------------|--|--------------------------|------------------------------------|---------|-----------------------|--|
| | | Media | Acumula- ción Media (mes) | Mediana | Total (2 meses) | Acumula- ción Total (2 meses) | Media | Acumula- ción Media (mes) | Mediana | Total (2 meses) | Acumula- ción Total (2 meses) |
| Previo al incendio | Cuenca Alta | 0,017 | 0,017 | 0,017 | 0,033 | 0,033 | 0,043 | 0,043 | 0,043 | 0,087 | 0,087 |
| | Cuenca Media | 0,055 | 0,072 | 0,055 | 0,110 | 0,143 | 0,143 | 0,187 | 0,143 | 0,287 | 0,373 |
| | Cuenca Rincon Victoria | 0,087 | 0,158 | 0,087 | 0,173 | 0,317 | 0,226 | 0,412 | 0,226 | 0,451 | 0,824 |
| | Cuenca Victoria | 0,032 | 0,190 | 0,032 | 0,064 | 0,380 | 0,083 | 0,495 | 0,083 | 0,166 | 0,990 |
| Post- Incendio | Cuenca Alta | 0,017 | 0,017 | 0,017 | 0,034 | 0,034 | 0,044 | 0,044 | 0,044 | 0,089 | 0,089 |
| | Cuenca Media | 0,056 | 0,073 | 0,056 | 0,112 | 0,146 | 0,146 | 0,190 | 0,146 | 0,292 | 0,381 |
| | Cuenca Rincon Victoria | 0,088 | 0,161 | 0,088 | 0,176 | 0,322 | 0,228 | 0,419 | 0,228 | 0,457 | 0,838 |
| | Cuenca Victoria | 0,032 | 0,193 | 0,032 | 0,063 | 0,385 | 0,083 | 0,501 | 0,083 | 0,165 | 1,003 |
| Impacto Incendio | Cuenca Alta | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,002 | 0,002 |
| | Cuenca Media | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,002 | 0,003 | 0,003 | 0,004 | 0,003 | 0,006 | 0,008 |
| | Cuenca Rincon Victoria | 0,001 | 0,003 | 0,001 | 0,002 | 0,005 | 0,003 | 0,007 | 0,003 | 0,006 | 0,013 |
| | Cuenca Victoria | -0,081 | 2,476 | -0,081 | -0,163 | 4,952 | 0,000 | 0,006 | 0,000 | 0,000 | 0,013 |

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de resultados de software WEAP.

El caudal promedio de la cuenca Victoria ente agosto de 2017 y septiembre de 2017 varía entre los 0,017 y 0,193 m³/s entre la naciente de la Cuenca Alta y el desfogue de la Cuenca Victoria. En su transcurso llega a acumular en un escenario de Incendio aproximadamente ente 0,043 y 0,501 Hm³ de agua y en un escenario sin Incendio aproximadamente entre 0,042 y 0,495 Hm³ de agua entre la naciente de la Cuenca Alta y el desfogue de la Cuenca Victoria. Este hallazgo permite

identificar el impacto inmediato del incendio en el volumen de agua que evidencia una diferencia de 0,013 Hm³ en los 2 meses de análisis para toda la cuenca.

- Punto control afluencia con el río Guadalquivir

Finalmente se analiza el comportamiento del volumen multianual de la cuenca Victoria para los años 2016 al 2019 en los que se puede explorar los cambios directos del caudal producto del incendio.

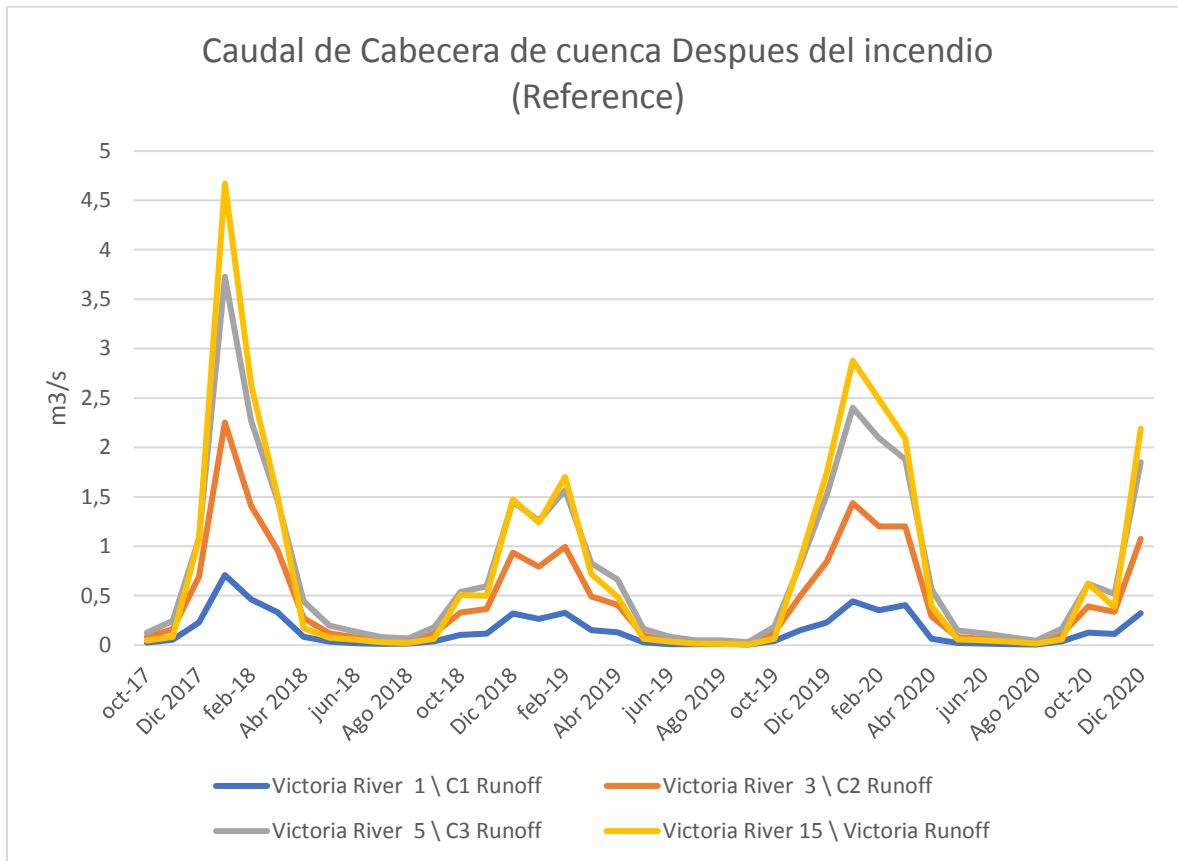


Figura 5.3. Caudal de cabeceras de cuencas después del incendio (reference).

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de software WEAP.

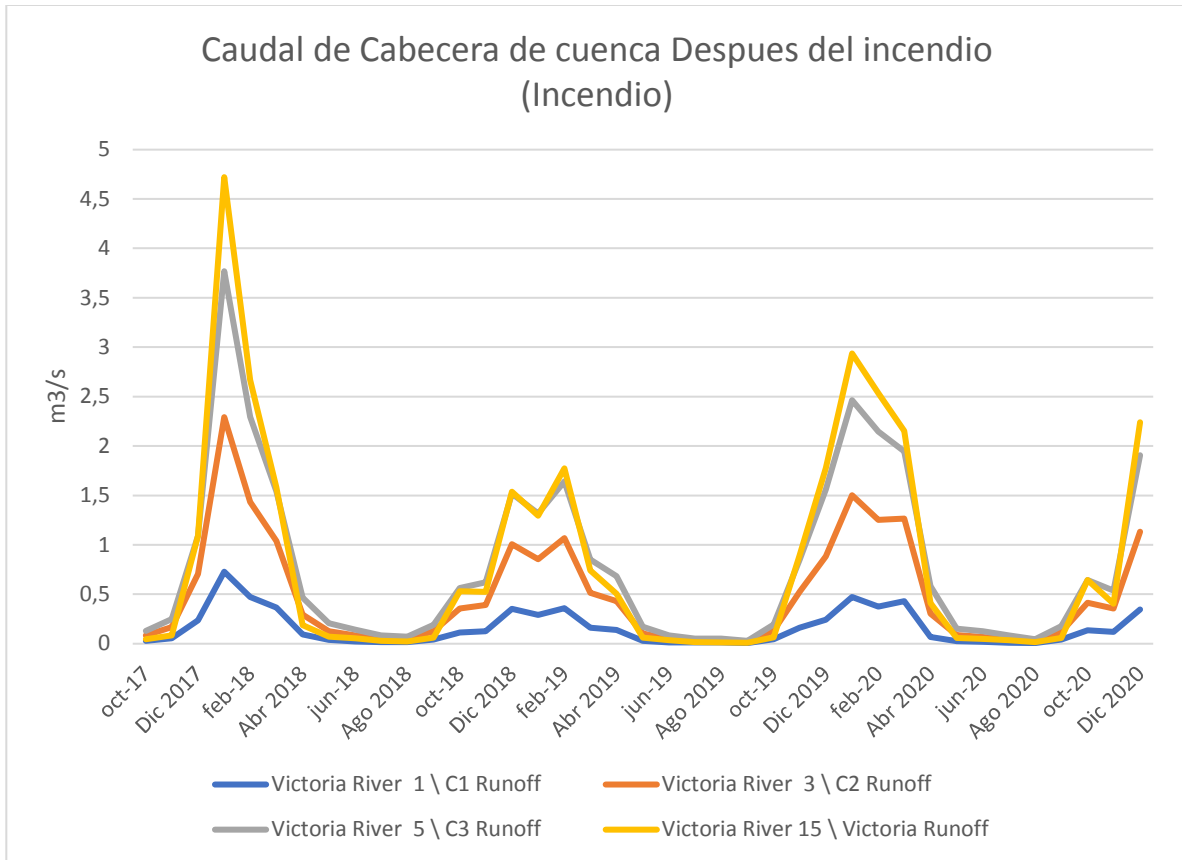


Figura 5.4. Caudal de cabeceras de cuencas después del incendio (Incendio).

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de software WEAP.

Tabla 5.3. Volumen en la afluencia río Guadalquivir.

| Años | Volumen Hm³ | Descripción |
|-------------|-------------------------------|--------------------|
| 2016 | 52,060 | Pre incendio |
| 2017 | 54,010 | Pre incendio |
| 2018 | 74,004 | Post incendio |
| 2019 | 46,459 | Post incendio |

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de resultados de software WEAP.

Como se puede observar en la Tabla 5.1 el volumen pre incendio es de 106,071 Hm³ en el escenario pre incendio 2016-2017. En cuanto a post incendio es de 120,464 Hm³ 2018-2019. Lo que genera un aumento de Volumen de 14,393 Hm³ en la escorrentía superficial en toda la cuenca Victoria.

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES.

- El Incendio Forestal suscitado entre el 9 y 13 agosto de 2017 se expandió en aproximadamente 35,90 km² dentro la cuenca de la Victoria, produciendo un cambio significativo en la dinámica hídrica de la cuenca, afectando tanto la cantidad como la calidad del agua disponible.
- Durante los primeros años posteriores al incendio, se identificó una disminución significativa en los valores de NDVI, indicando una pérdida de vegetación y una fase inicial de recuperación. Sin embargo, a medida que avanza el tiempo, se registró un aumento gradual en los valores de NDVI, lo que sugiere una recuperación progresiva de la cobertura vegetal en la cuenca.
- Hay mayor abundancia de datos climáticos y se seleccionó GMET2020 ya que al realizar un análisis con las demás fuentes, esta dio estadísticos aceptables. Por otro lado, la información hidrométrica se tienen datos de 2 años y su forma de registrar son diarias y se lo toma de manera mensual.
- El modelo hidrológico ha sido calibrado para marzo de 2018 a febrero de 2019 y validado de marzo 2019 a febrero de 2020. Los parámetros más sensibles fueron el factor de resistencia a la escorrentía RRF y Kc. La base referencial han sido los aportes de Gonzales 2016, SEI 2014 y Espejo 2016.
- El incendio ha influido enormemente en la escorrentía superficial y la capacidad de retención de agua superficial. El cambio progresivo de la cobertura vegetal ha causado menor infiltración por la falta de vegetación densa y la aparición de mayores pastizales. Situación que ha influenciado en el incremento del caudal. Existe una alta posibilidad de que nuevos incendios produzcan mayores caudales y estos a su vez disminuyan la capacidad de retención natural de agua de los bosques y/o la vegetación húmeda (bofedales) de la Victoria.
- El balance hídrico muestra que el incremento de la escorrentía superficial ha generado pérdidas de 14,393 Hm³ de agua. Situación que aparentemente beneficia a la Toma IV y las comunidades de la cuenca, pero que incurre en una menor retención de agua para el sistema natural.

6.2. RECOMENDACIONES.

- Dado que la propagación del incendio fue influenciada significativamente por la densidad de la vegetación, se recomienda el desarrollo de planes de gestión de incendios que consideren estos factores. Esto incluye la creación de franjas en áreas de alta pendiente y la gestión del combustible vegetal para reducir la carga de biomasa en zonas críticas.
- Para mejorar la precisión de los modelos hidrológicos y de recuperación de vegetación, se recomienda fortalecer la red de estaciones meteorológicas e hidrométricas en la región. Esto garantizará la disponibilidad de datos climáticos de alta calidad y en tiempo real, lo cual es crucial para la calibración y validación de modelos predictivos.
- Es fundamental incrementar la educación y conciencia en las comunidades locales sobre la prevención de incendios forestales.
- Programas de educación ambiental, talleres y campañas de sensibilización pueden ayudar a reducir las actividades humanas que podrían desencadenar incendios, como la quema agrícola no controlada y el uso inadecuado del fuego. Como así también en las escuelas debería existir una asignatura de Medio Ambiente para concientizar desde niños.
- Este estudio también reconoce ciertas limitaciones, como la disponibilidad limitada de datos y la falta de estudios comparativos con otros incendios en la región. Estas limitaciones sugieren la necesidad de realizar investigaciones futuras que puedan abordar estos aspectos, utilizando metodologías más vigorosas para obtener una comprensión más precisa y completa del fenómeno.
- Dado el impacto del incendio en la oferta hídrica superficial, se recomienda desarrollar estrategias específicas para la gestión de recursos hídricos post-incendio. Estas estrategias deben incluir la conservación de suelos y agua, la construcción de infraestructuras de retención y almacenamiento de agua, y la implementación de prácticas agrícolas y forestales sostenibles que reduzcan la escorrentía y mejoren la infiltración