

1. CAPÍTULO I : ASPECTOS GENERALES.

1.1. Introducción.

El proyecto de la presa “Sella – Rumicancha” surge como respuesta a una necesidad en la comunidad de Rumicancha y áreas circundantes desde la década de los 80. La escasez de agua para la producción agropecuaria ha sido una preocupación constante, afectando significativamente la productividad agrícola de la región.

La presa Rumicancha, ubicada en la comunidad del mismo nombre, fue planificada como una solución para este problema. Se trata de una presa de escollera compactada, proyectada en el diseño, un volumen útil de almacenamiento de 11 418 227,50 m³ y una altura de 41 m, con una longitud de cierre de 314,44 m. Su construcción inició en mayo de 2016 y finalizó con el acto de recepción definitiva del proyecto "CONSTRUCCIÓN PRESA SELLA RUMICANCHA, FASE I – TARIJA", el 13 de abril de 2021.

El proyecto incluye canales de trasvases desde los ríos Chaupicancha y Negro Muerto, los cuales no fueron construidos, así como un canal de aducción "Jarcas – Rumicancha" desde la presa Jarcas, cuya construcción está prevista en una fase posterior. Sin embargo, la falta de construcción de estos trasvases ha generado deficiencias en el aporte hídrico esperado para la presa “Sella – Rumicancha”.

El presente proyecto tiene como objetivo analizar la regulación del embalse “Sella – Rumicancha” para diferentes escenarios de oferta hídrica en condiciones de año seco. La variabilidad en la disponibilidad de agua influenciada por el cambio climático a través del tiempo de los últimos años, puede afectar significativamente el rendimiento del embalse, en el sentido que la oferta mensual podría presentar variaciones con la oferta estimada en el estudio Técnico Económico, Social y Ambiental (TESA) del proyecto de la presa.

Para ello, se realizará un análisis de las áreas de aporte hídrico y los trasvases previstos, identificando escenarios que puedan limitar el volumen disponible en el embalse. Además, se llevarán a cabo simulaciones de regulación para modelar el comportamiento bajo diferentes condiciones de oferta hídrica, determinando el impacto en la infraestructura y su efecto en la capacidad operativa.

1.2. Planteamiento y formulación del problema.

1.2.1. Descripción del problema.

El embalse “Sella – Rumicancha”, se enfrenta a una problemática relacionado con su capacidad de almacenamiento y regulación de agua, lo que ha generado preocupación en términos de sostenibilidad hídrica y agrícola. Originalmente concebido como una solución para mitigar la escasez de agua en la región, el embalse debía asegurar un suministro continuo y suficiente para el uso en la agricultura. Sin embargo, la realidad ha demostrado que la oferta hídrica actual es insuficiente para llenar el embalse a su capacidad máxima, lo que pone en riesgo su función esencial.

El problema se agrava debido a la variabilidad en la disponibilidad de agua, influenciada por el cambio climático y el tiempo transcurrido desde el estudio TESA de 2012 hasta la actualidad. Además, la falta de infraestructura clave, como los trasvases planificados desde los ríos Chaupicancha y Negro Muerto, y la no construcción de la presa Jarcas con la tubería de aducción "Jarcas – Rumicancha", ha limitado la capacidad del embalse para captar y almacenar volúmenes adicionales de agua, lo que agrava aún más la situación.

La escasez de agua para riego ha resultado en una reducción en el área cultivable efectiva, afectando la seguridad alimentaria y económica de la región. Además, la competencia por los escasos recursos hídricos puede generar tensiones sociales entre diferentes sectores de la comunidad, quienes dependen del agua para sus actividades diarias y productivas.

1.2.2. Planteamiento del problema.

El problema de la insuficiencia hídrica en el embalse “Sella – Rumicancha” es complejo y multifactorial, reflejando fallas tanto en la planificación inicial del proyecto como en su implementación y operación. La planificación de la infraestructura hídrica no contempló ciertas medidas que afectaron al volumen útil de almacenamiento, ya que la capacidad real del embalse fue modificado debido al cambio de ubicación de la presa, que provoca una reducción en los volúmenes característicos. A esto se suma la falta de construcción de infraestructuras críticas, como los trasvases desde los ríos Chaupicancha y Negro Muerto y la presa Jarcas con el sistema de aducción "Jarcas – Rumicancha", que estaban destinados a complementar el aporte hídrico del embalse.

Estas deficiencias en la infraestructura han limitado severamente el flujo de agua hacia el embalse, impidiendo su llenado completo y, por lo tanto, comprometiendo su capacidad de almacenamiento. La situación se ve agravada por la variabilidad en la disponibilidad de agua, la cual no ha sido adecuadamente modelada ni gestionada en el diseño del proyecto. El cambio climático ha alterado los patrones de precipitación, lo que ha resultado en una oferta hídrica diferentes a la prevista para el embalse.

La falta de una regulación adecuada del embalse para adaptarse a estos diferentes escenarios de oferta hídrica, podría generar un manejo inadecuado del recurso hídrico disponible e ineficiencias en la distribución del agua para riego, afectando la productividad agrícola y, por ende, la economía regional. La situación actual plantea la necesidad urgente de reevaluar y ajustar las estrategias de regulación del embalse, considerando los diversos escenarios de oferta hídrica que pueden presentarse debido a la variabilidad climática y las deficiencias en infraestructuras del embalse.

En resumen, el problema radica en la limitación del embalse “Sella – Rumicancha” para operar eficientemente bajo las condiciones actuales de oferta hídrica, debido a una combinación de infraestructuras incompletas y una falta de adaptación a la variabilidad climática. Esto requiere una intervención integral que no solo aborde las deficiencias en la infraestructura existente, sino que también desarrollar un marco de regulación dinámico que permita optimizar la gestión del embalse bajo diferentes escenarios de disponibilidad de agua, de esta manera con los resultados obtenidos servirán para reevaluar la construcción y capacidad de las infraestructuras pendientes por implementarse.

1.2.3. Formulación del problema.

¿Cómo puede la regulación del embalse “Sella – Rumicancha” para diferentes escenarios de oferta hídrica mejorar la gestión del recurso hídrico, optimizar el almacenamiento y distribución del agua para riego, considerando la insuficiencia actual de los volúmenes de aporte y la falta de la infraestructura de trasvases?

1.3. Objetivo general y específicos.

1.3.1. Objetivo general.

Analizar la regulación del embalse “Sella – Rumicancha” para diferentes escenarios de oferta hídrica, mediante la actualización de los volúmenes de entrada mensuales para optimizar la gestión del almacenamiento y el aprovechamiento del recurso hídrico disponible en el embalse.

1.3.2. Objetivos específicos.

- a) Desarrollar un análisis de los aportes al embalse y de los trasvases contemplados en la FASE I – II del proyecto, para abordar las posibles deficiencias de estas y su efecto en el tiempo de llenado y el total de volumen aprovechable.
- b) Utilizar la información de base del modelo WEAP "Guadalquivir_3" (incluyendo datos de demanda, clima, uso de suelo e información hidrométrica) para desarrollar un modelo personalizado que permita estudiar las subcuencas de aporte al embalse “Sella – Rumicancha”, y evaluar cómo estos datos influyen en la regulación y capacidad operativa del embalse bajo diferentes escenarios de oferta hídrica.
- c) Realizar una regulación hidrológica actual del embalse a nivel mensual considerando ingresos, pérdidas y demandas, con el fin de analizar una gestión eficiente del volumen disponible.
- d) Simular el comportamiento del embalse en condiciones críticas de oferta (año seco), a través de una regulación hidrológica, para la evaluación del impacto que tendrá el funcionamiento del o de los trasvases bajo diferentes escenarios de oferta hídrica.

1.4. Hipótesis.

La regulación del embalse “Sella – Rumicancha”, a través de la integración de caudales medios mensuales provenientes del modelo WEAP desarrollado (“SellaQuebrada_1”) y la implementación de estrategias de gestión hidrológica adecuadas para diferentes escenarios de oferta hídrica podría ofrecer nuevas condiciones para reevaluar la implementación de las infraestructuras de trasvases.

1.4.1. Análisis de variables.

Variable dependiente: La variable dependiente en este estudio es la aportación de agua que llega al embalse de la presa “Sella – Rumicancha”.

Variable independiente: La variable independiente es la regulación hidrológica del embalse basada en la integración de datos hidrológicos obtenidos del modelo WEAP desarrollado y la implementación de estrategias de gestión hidrológica adaptadas a diferentes escenarios de oferta hídrica.

1.4.2. Definición conceptual.

Variable dependiente.

La variable dependiente en este estudio es el volumen de agua que llega al embalse de la presa “Sella – Rumicancha” procedente de diversas fuentes, como los trasvases planificados y otras fuentes de agua. Esta variable representa el volumen cuantificable de agua que ingresa al embalse durante un período de tiempo determinado y su capacidad para llenar hasta su máxima capacidad.

Variable independiente.

La regulación hidrológica adaptada a diferentes escenarios de oferta hídrica implica la aplicación de estrategias de gestión del agua basadas en datos obtenidos del modelo WEAP “SellaQuebrada_1”. Esto incluye la planificación y ejecución de medidas que optimicen la captación y el almacenamiento, teniendo en cuenta las variaciones temporales y espaciales en la oferta hídrica.

1.5. Justificación.

Este estudio tiene una relevancia académica significativa, ya que servirá como base para el desarrollo del proyecto de grado en la carrera de Ingeniería Civil. Al abordar una problemática real y compleja relacionada con la gestión de recursos hídricos y la infraestructura hidráulica, se tendrá la oportunidad de aplicar los conocimientos teóricos adquiridos en la formación académica a un caso práctico y relevante. Además, el proceso de investigación y análisis ofrecerá una valiosa oportunidad para aplicar metodologías científicas y técnicas de ingeniería en la solución de desafíos prácticos y concretos.

La investigación se basará en documentos y estudios técnicos sólidos, como ser el Estudio TESA “Construcción Presa Sella – Rumicancha” y bibliografía relacionada a la regulación de ríos, lo que garantiza un enfoque riguroso y fundamentado en la realidad. Al analizar detalladamente la problemática relacionada con que la presa “Sella – Rumicancha” no alcanza a llenar su capacidad máxima debido a la falta de trasvases y proponer soluciones viables, el estudio contribuirá al conocimiento técnico relacionado con la aplicación de modelación hidrológica WEAP, para obtener datos precisos sobre caudales medios mensuales que permitirá desarrollar estrategias de regulación más efectivas, contribuyendo a mejorar la eficiencia del embalse y la seguridad hídrica regional.

Existe un interés institucional por parte de la institución SEDEGIA (Servicio Departamental de Gestión Integral del Agua), ya que la administración de la presa “Sella – Rumicancha” se encuentra bajo su responsabilidad, entonces el presente estudio tiene implicaciones institucionales significativas, al ofrecer información clave para la toma de decisiones en la gestión de la infraestructura hídrica existente. Al abordar un problema concreto y proponer soluciones prácticas basadas en modelos y simulaciones hidrológicas, este estudio no solo contribuirá al avance del conocimiento en ingeniería civil, sino que también tendrá un impacto directo en la sostenibilidad hídrica y agrícola de la región.

1.6. Alcance del Trabajo.

El proyecto se centrará en analizar la regulación a nivel mensual del embalse “Sella – Rumicancha” en función de los datos hidrológicos obtenidos del modelo WEAP desarrollado (SellaQuebrada_1) y la implementación de estrategias de gestión para diferentes escenarios de oferta hídrica. Se llevará a cabo un análisis de los aportes mensuales de la cuenca Rumicancha y los trasvases Negro Muerto y Chaupicancha, así como también el sistema de aducción "Jarcas – Rumicancha", seguido de una regulación hidrológica del embalse, evaluando el impacto de estas medidas en su capacidad operativa.

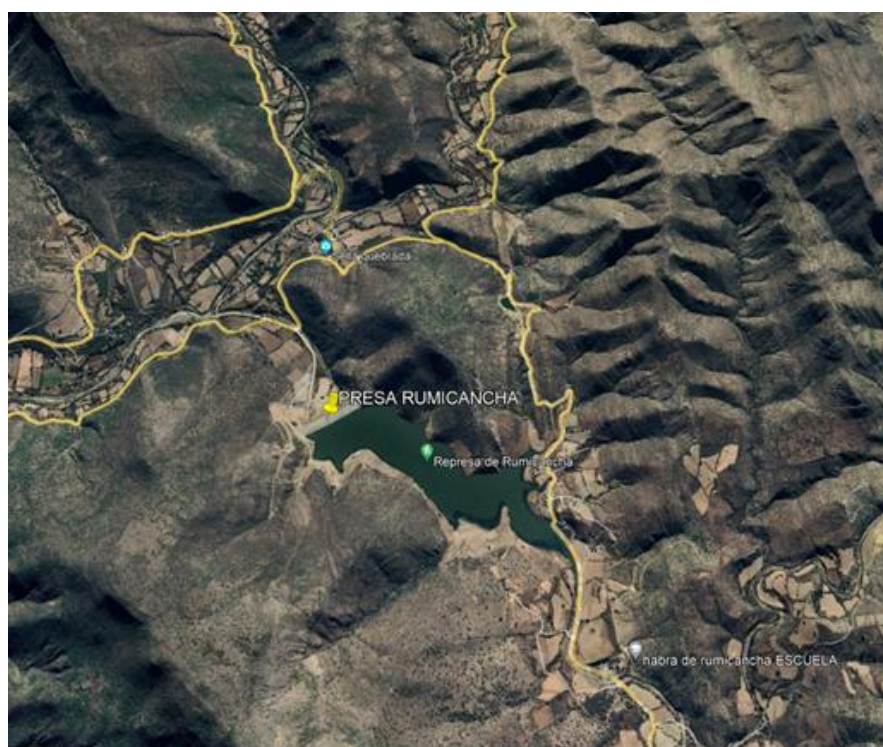
Los aportes hídricos estimados por el modelo WEAP son a nivel mensual, estos serán usados para la regulación de los diferentes escenarios, los cuales se ajustarán a las recomendaciones del MMAyA y VRHR. Estas recomiendan que, en ausencia de datos suficientes, los volúmenes mensuales aprovechables se calculen al 75% de persistencia (año seco), basados en información cartográfica del clima, suelos y cobertura vegetal.

El trabajo no incluirá nuevos trasvases, sino que se enfocará en los trasvases ya planeados en el estudio TESA, la optimización de la infraestructura existente y la mejora en la gestión del recurso hídrico.

1.6.1. Delimitación Espacial.

El estudio principal del proyecto se centra en la presa “Sella – Rumicancha”, la cual geográficamente se sitúa en las coordenadas 327 187 62 E y 7 633 243,73 N. La cota en el lecho del río donde se construyó la presa está a 2 154 msnm.

Figura 1.1. Localización de la presa Sella-Rumicancha.



Fuente: Elaboración propia.

La presa “Sella – Rumicancha”, se encuentra ubicada dentro de los límites de la comunidad de Rumicancha y tiene las siguientes coordenadas de ubicación referidas al eje de la presa la cuales son:

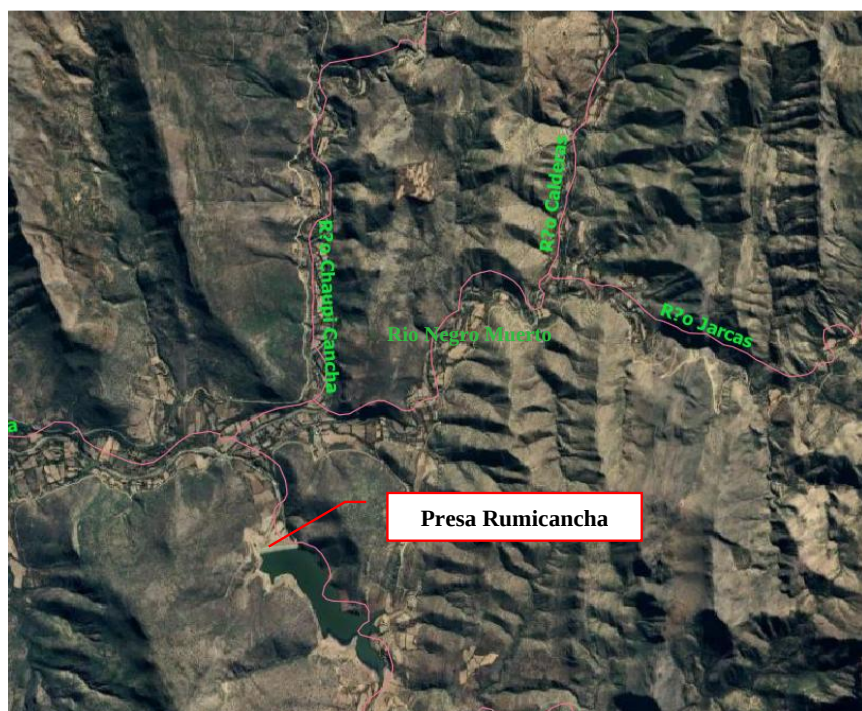
Tabla 1.1. Coordenadas de la presa Sella-Rumicancha.

Descripción	Este	Norte
Lado izquierdo	327 001,000	7 633 212,000
Lado derecho	327 369,000	7 633 277,000

Fuente: ESTUDIO TESA: “CONSTRUCCIÓN PRESA SELLA – RUMICANCHA”.

Las áreas de aporte de los posibles trasvases a implementar que pertenecen a los ríos de Chaupicancha, Calderas y Negro Muerto (confluencia con el río Calderas y Jarcas).

Figura 1.2. Localización de los ríos pertenecientes a las potenciales áreas de aporte para los posibles trasvases.



Fuente: Elaboración propia.

Las siguientes coordenadas se especifica las coordenadas de los ríos ya mencionados:

Tabla 1.2. Coordenadas de los ríos de aporte.

RIO	DESCRIPCIÓN	COORDENADAS	
		ESTE (m)	NORTE (m)
Chaupi Cancha – Negro Muerto	Punto de desembocadura	327 297,18	7 634 335,68
Calderas - Jarcas	Punto de desembocadura	329 219,78	7 635 400,36

Fuente: Elaboración propia.

1.6.2. Delimitación Temporal.

La delimitación temporal de este estudio se establece en función de la disponibilidad de datos pluviométricos y climatológicos de la estación meteorológica "Sella Quebrada," la cual es la única estación cercana al área de estudio utilizada en este proyecto. Los datos de esta estación cubren el periodo de 1980 a 2023, proporcionando información esencial sobre las

condiciones climáticas y la precipitación en la región de estudio. Para la realización del modelo WEAP, se ha tomado como base el modelo "Guadalquivir_3", que utiliza una serie de datos comprendida entre 1 980 y 2 020. Este periodo constituye el marco temporal de referencia para el desarrollo y análisis de los escenarios hídricos en este estudio.

Tabla 1.3. Estación Sella Quebradas.

Estación climatológica	Latitud S.	Longitud O.	Altitud (m.s.n.m.)	Periodo observado
Sella Quebradas	21° 23' 11"	64° 40' 52"	2 080	1 985 – 2 024

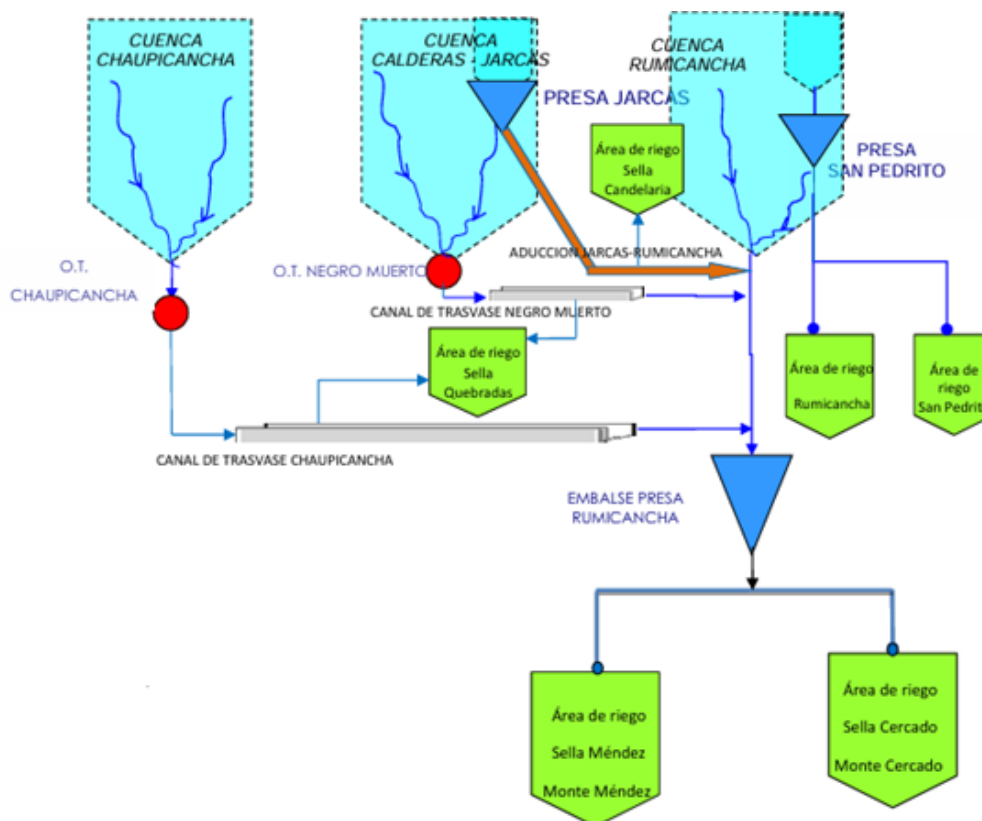
Fuente: Elaboración propia.

1.7. Método de trabajo (Metodología).

El presente trabajo de investigación se encuentra en el marco descriptivo – explicativo. La realización del proyecto de investigación, se hará de acuerdo a las siguientes fases:

FASE I: DIAGNÓSTICO Y CONTEXTUALIZACIÓN.

Figura 1.3. Esquema del diseño del proyecto contemplando en el TESA.



Fuente: ESTUDIO TESA: "CONSTRUCCIÓN PRESA SELLA – RUMICANCHA.

1) Revisión de documentación existente:

- *Recopilación y análisis documental:* Recopilar y revisar todos los documentos existentes relacionados con el proyecto de la presa “Sella – Rumicancha”, incluidos el TESA (Estudio Técnico Económico Social Ambiental), informes técnicos, planos y otros materiales relevantes.
- *Análisis de datos hidrológicos históricos:* Recolectar y examinar datos históricos de precipitación, caudales de los ríos y niveles de almacenamiento del embalse para entender el comportamiento hidrológico del sistema.

2) Análisis de limitaciones y deficiencias:

- *Identificación de deficiencias estructurales:* Evaluar las deficiencias en la infraestructura actual, como la falta de construcción de los trasvases desde los ríos Chaupicancha y Negro Muerto, y el canal de aducción "Jarcas – Rumicancha".
- *Detección de limitaciones en los datos:* Identificar posibles limitaciones en los datos disponibles, incluyendo la falta de mediciones precisas de volúmenes de agua aportados y la desactualización de datos en relación con la variabilidad climática.

3) Revisión bibliográfica:

- *Investigación comparativa:* Revisar estudios y proyectos similares en otras regiones para identificar estrategias exitosas en la regulación de embalses bajo condiciones de oferta hídrica variable y sus aplicaciones potenciales al proyecto “Sella – Rumicancha”.

FASE II: EVALUACIÓN DE RECURSOS Y CUANTIFICACIÓN DE APORTES HÍDRICOS.

1) Recopilación de datos hidrológicos:

- *Obtención y actualización de datos hidrológicos:* Recopilar datos hidrológicos actuales, incluyendo precipitación, caudales de los ríos y niveles de almacenamiento. Utilizar el modelo WEAP “Guadalquivir_3” para desarrollar otro modelo

personalizado, que permita la estimación de los caudales medios mensuales para modelar las aportaciones a la presa.

- *Cuantificación de volúmenes de aporte:* Aplicar métodos de análisis hidrológico para cuantificar los volúmenes de agua aportados al embalse en diferentes escenarios y períodos.

2) Análisis de los trasvases:

- *Evaluación del impacto de trasvases:* Analizar el potencial hídrico de los trasvases desde los ríos Chaupicancha y Negro Muerto, y el aporte "Jarcas-Rumicancha", para evaluar su capacidad para complementar el aporte hídrico al embalse.
- *Simulación de trasvases y su aporte:* Realizar simulaciones que consideren la implementación de los trasvases y su impacto en el volumen total de agua disponible para el embalse.

FASE III: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS Y REGULACIÓN.

1) Evaluación de impacto de los trasvases:

- *Análisis de escenarios hidrológicos:* Evaluar los resultados obtenidos en la fase anterior para determinar el impacto de los trasvases y la variabilidad climática en la capacidad de llenado y la gestión del embalse bajo diferentes escenarios de oferta hídrica.
- *Impacto en la agricultura:* Estimar cómo la variabilidad en la oferta hídrica y los trasvases afectan la disponibilidad de agua para riego.

2) Diseño de estrategias de regulación hidrológica:

- *Desarrollo de estrategias dinámicas:* Formular estrategias de regulación hidrológica basadas en los escenarios evaluados, considerando la variabilidad en la oferta hídrica y la integración de los trasvases.
- *Simulación de gestión de embalse:* Utilizar modelos de simulación hidrológica para evaluar la eficacia de las estrategias propuestas en la optimización del llenado y gestión del embalse.

3) Propuesta de soluciones y recomendaciones:

- *Formulación de soluciones prácticas:* Proponer recomendaciones específicas para mejorar la gestión y operación de la presa para cada escenario analizado, incluyendo ajustes en la infraestructura existente y estrategias de regulación más efectivas.
- *Evaluación de la viabilidad de trasvases pendientes:* Considerar la revalorización de la construcción y capacidad de las infraestructuras de trasvases aún pendientes.

FASE IV: PROPUESTAS DE GESTIÓN Y OPTIMIZACIÓN.

1) Desarrollo de propuestas concretas:

- *Optimización de la gestión hídrica:* Elaborar propuestas dirigidas a maximizar el aprovechamiento de los recursos hídricos disponibles, basadas en los hallazgos obtenidos en las fases anteriores.
- *Metas y objetivos claros:* Definir objetivos y metas específicos para cada propuesta, asegurando que sean alcanzables y alineadas con la mejora en la gestión y optimización del embalse.

2) Propuesta de implementación:

- *Plan de implementación:* Proponer un plan de implementación de las estrategias desarrolladas, incluyendo el monitoreo continuo de los resultados y ajustes necesarios para garantizar la sostenibilidad del embalse “Sella – Rumicancha” bajo diferentes escenarios de oferta hídrica.

2. CAPÍTULO II : FUNDAMENTO TEÓRICO.

2.1. Presas y embalses.

Un embalse es un depósito artificial (volumen) de agua que se forma por el cierre del cauce a través de la construcción de una presa.

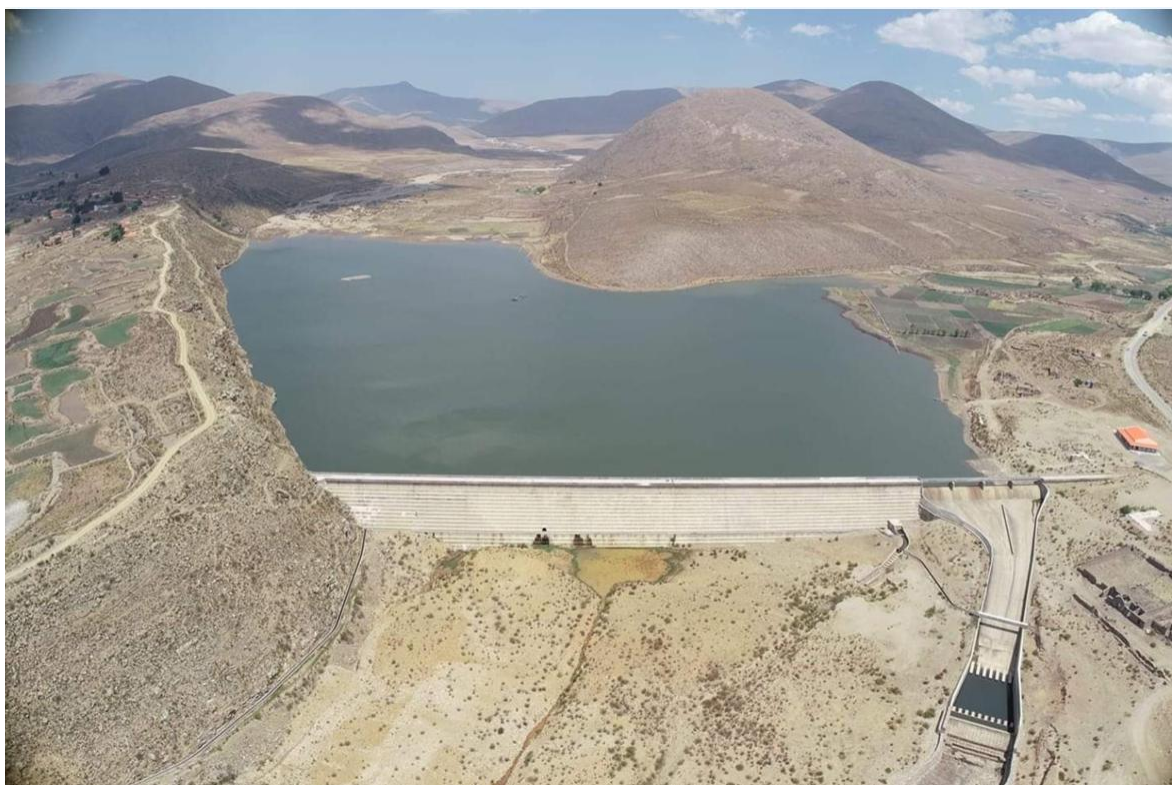
La presa o dique es la estructura que cierra el cauce del río con el propósito de encausar y elevar el nivel del agua, pueden ser diferentes materiales como ser: tierra, hormigón ciclópeo, hormigón armado, etc.

El vaso es la superficie que cubre el embalse aguas arriba de la presa.

Los embalses son implementados principalmente para cumplir las siguientes funciones:

- Para el almacenamiento y posterior regulación y dotación, que puede ser para consumo humano, riego, generación hidroeléctrica, turismo, etc.
- Para el control de avenidas e inundaciones.

Figura 2.1. Presa “El Molino”, ubicada en la provincia Méndez, Tarija – Bolivia.



Fuente: Elaboración propia.

2.1.1. Tipos de presas.

Las presas se pueden clasificar en distintas categorías, dependiendo del objeto que persiga la clasificación, como ser, según su utilización, diseño hidráulico y materiales utilizados en su construcción.

En la actualidad los tipos más comunes son: presas de tierra, escollera y de gravedad de hormigón.

2.1.1.1. Presas de tierra.

Las presas de tierra son el tipo más común, debido básicamente a que su construcción se utilizan los materiales en estado natural con un proceso mínimo. Además, los requisitos de cimentación para este tipo de presas son menos rigurosos que en otros (Bureau of reclamation, 2007).

2.1.1.2. Presas de escollera.

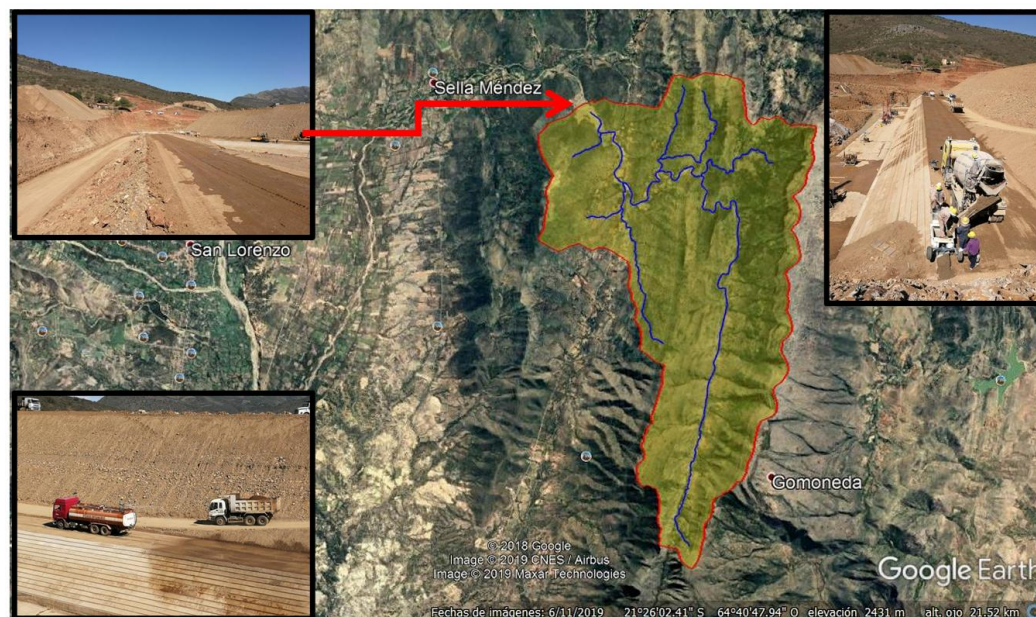
Las presas de escollera se construyen con rocas de diversos tamaños que aseguran la estabilidad de la estructura. Estas presas incluyen una barrera impermeable para garantizar su estanqueidad. Esta barrera puede consistir en una capa de tierra impermeable en el lado de aguas arriba, una losa de hormigón, una lámina de hormigón asfáltico, planchas metálicas o cualquier otro material impermeable. En algunos casos, esta barrera también puede estar constituida por un núcleo de material impermeable.

Las presas de escollera, al igual que las de tierra, pueden sufrir deformaciones si no se controlan adecuadamente, lo que podría llevar al desbordamiento. Por ello, se debe construir un aliviadero con suficiente capacidad para prevenir este tipo de eventos. Con excepción de las presas de derivación de muy poca altura, se debe diseñar la estructura de escollera para resistir estos movimientos. Las presas de escollera requieren cimentaciones adecuadas para evitar asentamientos que puedan dañar la barrera impermeable. Los materiales recomendados para la cimentación son rocas o gravas compactadas.

Este tipo de presa es adecuado en terrenos montañosos, donde es posible obtener la cantidad necesaria de roca, y en regiones donde los períodos de lluvias no son muy prolongados, ya que durante la construcción es esencial evitar que el hormigón se vea afectado por la

humedad. Aunque estas presas se pueden construir en climas tropicales, es preferible que se erijan en zonas donde los períodos de lluvias sean menos intensos.

Figura 2.2. Presa de escollera “Sella – Rumicancha”.



Fuente: Elaboración propia con apoyo de Google Earth.

2.1.1.3. Presas de gravedad de hormigón.

Las presas de gravedad de hormigón son ideales cuando hay una buena cimentación en roca. Aunque también pueden construirse sobre terrenos aluviales si se agrega una pantalla. Estas presas pueden incluir aliviaderos de coronación, sirviendo también como aliviaderos en presas de escollera y tierra.

Las presas de gravedad pueden tener planta recta o curva, con ventajas en seguridad y coste. La tecnología de presas de hormigón compactado con rodillo (RCC) se ha desarrollado y se usa comúnmente, aunque sigue siendo una técnica en desarrollo.

2.1.2. Rendimiento del almacenamiento.

En el diseño de embalses, el análisis de la relación entre el rendimiento y la capacidad es probablemente uno de los aspectos más cruciales. El rendimiento se refiere a la cantidad de agua que el embalse puede proporcionar en un periodo de tiempo específico. Este intervalo puede variar desde un día hasta un año, dependiendo del tamaño del embalse y su propósito

de distribución. El rendimiento depende directamente del escurrimiento de aportación, el cual puede variar anualmente.

Varios proyectos de almacenamiento están diseñados para asegurar lo que se denomina rendimiento firme o seguro, que es la cantidad máxima de agua que puede garantizarse durante un periodo crítico de sequía. En la práctica, este periodo crítico se asume como el de menor escurrimiento natural en un año determinado, registrando un caudal mínimo. Esto conlleva la posibilidad de que, durante un periodo seco, el embalse ofrezca un rendimiento inferior al esperado. El agua disponible en exceso de este rendimiento firme, acumulada durante años con escurrimientos superiores, es conocida como rendimiento secundario.

2.1.3. Selección de la capacidad para un vaso fluvial.

Este análisis se conoce comúnmente como estudio de operación y consiste en una simulación de la operación del embalse durante un periodo determinado, siguiendo un conjunto de reglas previamente establecidas. El estudio de operación se diseña para identificar las mejores estrategias de operación y establecer la capacidad requerida para obras de control de avenidas, entre otras decisiones que son vitales durante la planificación de un proyecto.

El estudio de operación puede enfocarse en un periodo de caudales extremadamente bajos, seleccionado como el periodo crítico, o extenderse para abarcar todo el periodo histórico o registros sintéticos. En el primer caso, el estudio se limita a definir la capacidad necesaria para superar la sequía seleccionada, mientras que, en el segundo, se deben determinar los volúmenes de agua utilizables, para cada año del registro. El segundo enfoque es más completo, ya que incluye la probabilidad de diferentes caudales.

El estudio de operación puede realizarse con datos anuales, mensuales o incluso diarios. Los datos anuales, pueden producir resultados relativamente imprecisos, sobre todo cuando la variabilidad de los caudales es alta. Por ello, se recomienda el uso de datos mensuales o diarios cuando la precisión es esencial, como en la operación de embalses multipropósito, donde la secuencia de escurrimientos dentro del mes puede ser crítica para el desempeño del sistema.

2.2. Hidrología para presas.

La Hidrología aplicada a presas tiene como objetivo principal determinar los volúmenes de agua y sedimentos que circulan y se almacenan en un embalse. Estos volúmenes son cruciales para definir la altura total de la presa y otros parámetros de diseño. Una de las principales dificultades en este proceso radica en la precisión con la que se pueden estimar estos volúmenes, ya que se trata de un procedimiento que requiere una gran cantidad de datos. La falta de información o datos incompletos puede complicar significativamente esta tarea y aumentar la incertidumbre en los resultados.

Para abordar esta complejidad, es necesario emplear metodologías avanzadas y herramientas específicas que permitan una aplicación regional, ajustándose a la disponibilidad de información en cada caso particular. Estas metodologías incluyen modelos hidrológicos que simulan los procesos de escurrimiento y sedimentación, así como técnicas de análisis estadístico y geoespacial para estimar variables críticas donde la información directa es escasa o inexistente.

Bajo estos principios, la Hidrología para presas se orienta principalmente al dimensionamiento adecuado del embalse, que implica la determinación precisa de los diferentes volúmenes de agua y sedimentos que ocuparán el vaso. Este proceso puede ser extremadamente laborioso y complejo debido a la cantidad de variables involucradas y la necesidad de contar con datos fiables y detallados. Además, la variabilidad climática y las características hidrológicas propias de la cuenca aportan un nivel significativo de incertidumbre al diseño.

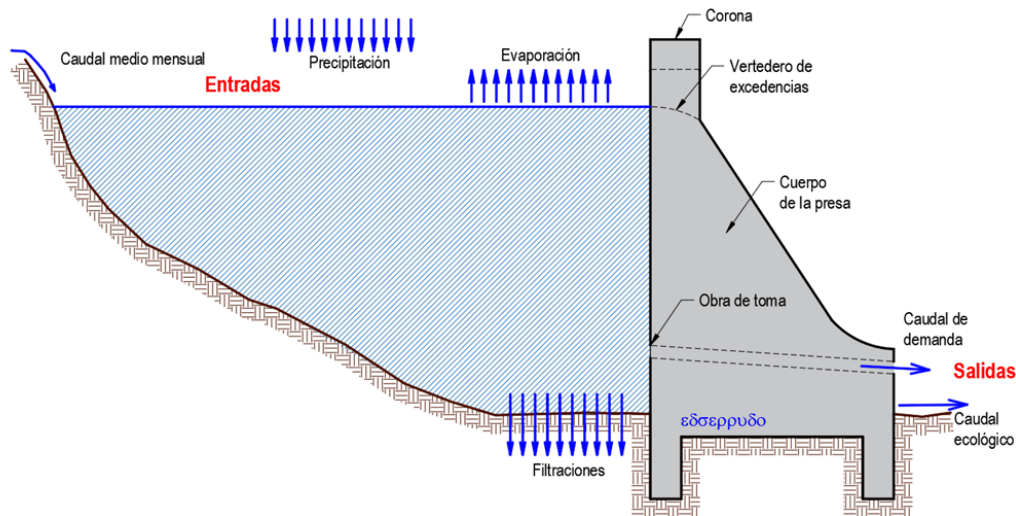
Por consiguiente, el diseño hidrológico de un embalse representa, en esencia, una aproximación a los procesos físicos que tienen lugar dentro del sistema. Es fundamental, por lo tanto, realizar estimaciones lo más precisas posible para minimizar los errores de diseño, garantizando así la seguridad y la funcionalidad del embalse a largo plazo. La correcta integración de todas estas variables en el proceso de diseño no solo mejora la fiabilidad del embalse, sino que también optimiza su operación bajo diferentes escenarios hidrológicos.

2.2.1. Diseño hidrológico del embalse.

El dimensionamiento del embalse contempla la determinación de los siguientes elementos:

- Las entradas o aportes de la cuenca al embalse (oferta hídrica de la cuenca).
- Las salidas del embalse.
- Los volúmenes característicos del embalse.

Figura 2.3. Esquema de las principales salidas y entradas de un embalse.



Fuente: Elaboración propia.

2.2.1.1. Entradas al embalse.

Las entradas por cuenca propia: Esto se refiere a la escorrentía superficial generada dentro de la propia cuenca hidrográfica, la cual depende de la precipitación, las características del terreno, y la vegetación. Cabe señalar que en algunas cuencas esta escorrentía puede ser mínima o incluso inexistente debido a factores como la alta permeabilidad del suelo o la presencia de depresiones topográficas que favorecen la infiltración.

Los afloramientos de agua en la cuenca: Estos incluyen manantiales y fuentes naturales de agua que emergen en la superficie dentro de la cuenca. Su presencia y magnitud pueden estar influidos por la geología del terreno, especialmente en áreas con formaciones kársticas o fracturadas que facilitan el flujo subterráneo.

Las lluvias sobre la cuenca: La precipitación directa es una fuente clave de oferta hídrica. Su variabilidad temporal y espacial puede ser considerable, afectando la disponibilidad de

agua en diferentes épocas del año. Es fundamental considerar tanto la cantidad como la intensidad de las lluvias para evaluar su contribución efectiva al caudal.

Cuando el vaso sea bastante extenso: En embalses de gran superficie, las lluvias directas sobre el espejo de agua pueden constituir una fuente significativa de ingreso. Aunque este aporte puede ser pequeño en comparación con la escorrentía, no debe ignorarse en el balance hídrico, especialmente en regiones con alta pluviosidad.

Los trasvases desde otras cuencas: En escenarios donde la cuenca no puede satisfacer por sí sola la demanda hídrica, se pueden implementar trasvases desde cuencas adyacentes o distantes. Estos trasvases pueden ser de carácter permanente o temporal, y requieren una planificación cuidadosa para minimizar impactos ambientales y asegurar la sostenibilidad del recurso.

Los deshielos en zonas montañosas muy frías: En regiones de alta montaña, el deshielo de glaciares y nieves perpetuas constituye una fuente crucial de agua, particularmente en la temporada seca. Este flujo es altamente dependiente de las temperaturas y puede variar significativamente de un año a otro debido a los efectos del cambio climático."

2.2.1.2. Salidas del embalse.

La demanda: Esta representa la principal salida de agua del embalse y está determinada por el tipo de aprovechamiento que se haga de la misma. La demanda puede ser constante o variable, dependiendo de los usos a los que se destine el agua, como el suministro de agua potable, el riego agrícola, la generación de energía hidroeléctrica, o el uso industrial. Cada tipo de demanda tiene sus propias características y requerimientos, lo que debe ser considerado en la gestión del embalse para asegurar la disponibilidad y sostenibilidad del recurso.

La evaporación desde el embalse: La evaporación es una pérdida significativa en muchos embalses, especialmente en climas cálidos y áridos. Esta pérdida es función de las características climáticas de la zona, como la temperatura, la humedad relativa, la radiación solar, y la velocidad del viento, así como del tamaño del espejo de agua. Cuanto mayor sea la superficie del embalse, mayor será la evaporación, lo que puede impactar en la disponibilidad de agua, especialmente durante períodos de sequía.

La infiltración en el embalse: La infiltración es el proceso mediante el cual parte del agua almacenada en el embalse se pierde hacia el subsuelo. Esta pérdida es difícil de cuantificar con precisión debido a la variabilidad del suelo y las condiciones geológicas subyacentes. Sin embargo, se puede estimar utilizando el balance hídrico del embalse o mediante otras metodologías como ensayos de permeabilidad in situ. La infiltración puede representar una salida significativa de agua, especialmente en embalses ubicados sobre suelos altamente permeables o fracturados.

El caudal ecológico: El caudal ecológico es fundamental para mantener el equilibrio ambiental en el río aguas abajo del embalse. Este caudal se destina a asegurar la conservación de la flora y fauna local, mantener la calidad físico-química de las aguas superficiales y subterráneas, y preservar el equilibrio geomorfológico dinámico del sistema fluvial. Además, el caudal ecológico contribuye a la protección de los valores sociales, económicos, culturales y paisajísticos asociados al río. La asignación de este caudal debe hacerse con cuidado para no comprometer el uso humano del agua mientras se asegura la sostenibilidad del ecosistema.

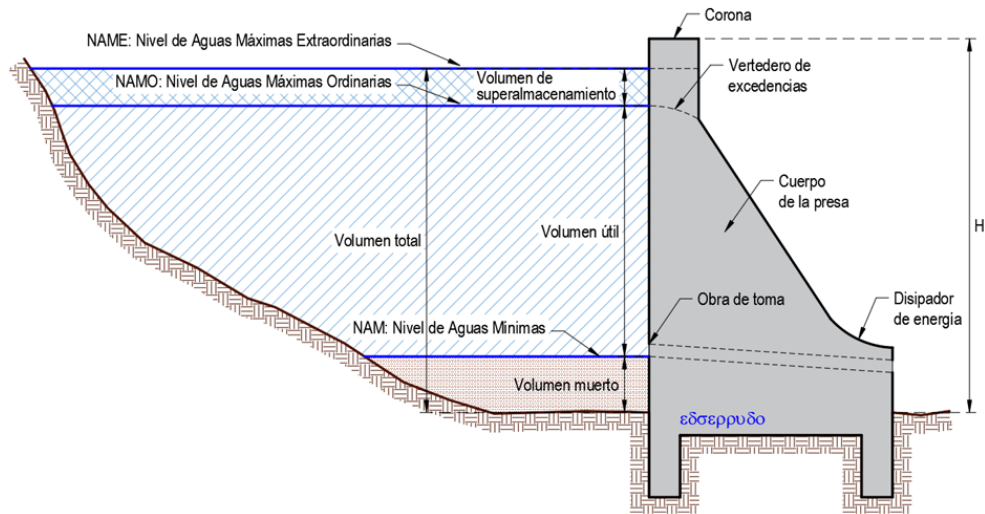
Los excedentes: Estos son los volúmenes de agua que superan la capacidad de almacenamiento del embalse y que, por tanto, deben ser evacuados mediante el vertedor de excedencias. Aunque estos excedentes no afectan directamente la operación del embalse, es crucial diseñar el vertedor adecuadamente para manejar de manera segura los eventos de crecida y minimizar el riesgo de inundaciones aguas abajo. Además, la gestión de excedentes puede incluir la consideración de planes de almacenamiento o trasvases para optimizar el uso del recurso hídrico.

Otros usos por terceros: Existen también otras salidas relacionadas con usos específicos por parte de terceros, como el consumo de agua potable aguas abajo del embalse, usos industriales, o incluso en el pasado, para alimentar molinos y otras instalaciones mecánicas. Estos usos requieren una gestión coordinada y regulada para asegurar que no interfieran con las principales demandas del embalse y se respeten los caudales asignados."

2.2.1.3. Niveles y volúmenes característicos.

Entre los volúmenes más comunes que puedes conformar el volumen total de un embalse, se tiene los siguientes:

Figura 2.4. Esquema de niveles y volúmenes característicos de un embalse.



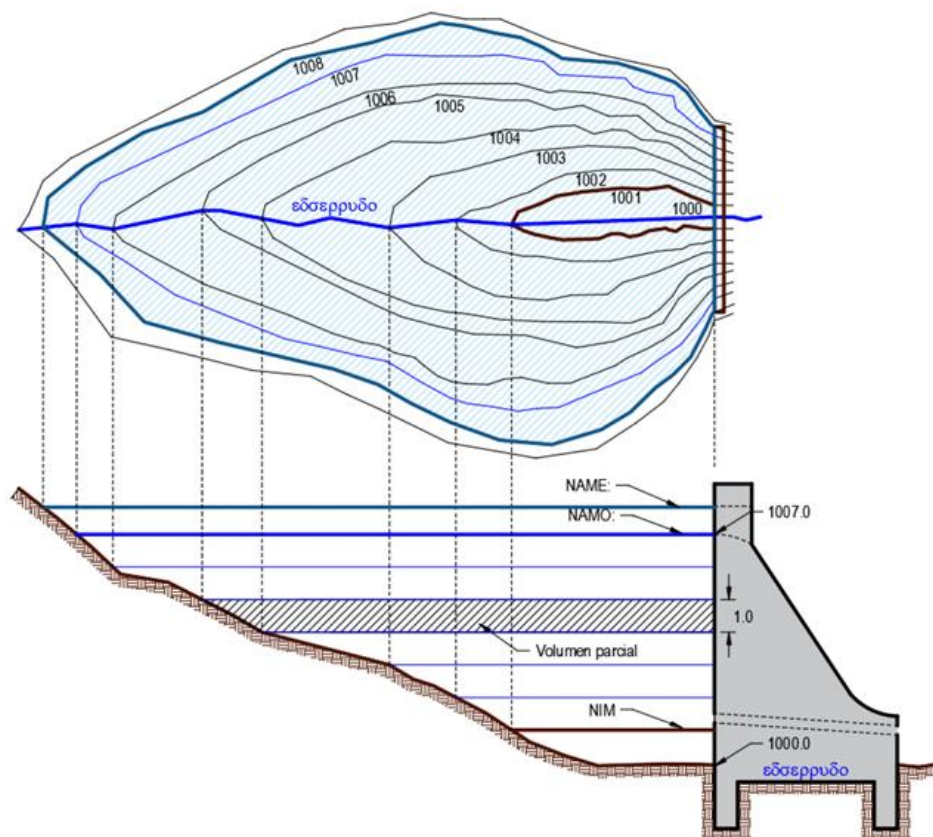
Fuente: Elaboración propia.

- **Volumen muerto:** Este volumen corresponde al espacio que será ocupado por los sedimentos acumulados a lo largo de la vida útil de la presa. Estos sedimentos provienen de la cuenca y son transportados por los cauces hacia el embalse. La estimación de este volumen se realiza mediante varios métodos, siendo la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) uno de los más empleados. Es recomendable que este volumen no supere un tercio de la altura total de la presa, con el límite superior definido por el Nivel de Aguas Mínimas (NAM).
- **Volumen útil:** Conocido también como volumen operativo, se refiere al volumen de agua regulado que está disponible para diversos usos, como suministro de agua potable, riego, entre otros. Este volumen está delimitado en su parte superior por el Nivel de Aguas Máximas Ordinarias (NAMO), el cual coincide con la cota de la cresta del vertedero.
- **Volumen de super almacenamiento:** Este volumen adicional se presenta temporalmente durante los periodos de crecidas, ubicándose entre el NAMO y el Nivel de Aguas Máximas Extraordinarias (NAME). En situaciones donde la presa ha alcanzado el final de su vida útil o cuando el NAM es superior al calculado inicialmente, es posible utilizar este volumen instalando compuertas en el vertedero, permitiendo así su aprovechamiento.

La gestión eficiente de estos volúmenes es crucial para el funcionamiento óptimo de la presa, garantizando que se puedan cumplir los objetivos de almacenamiento, control de inundaciones y suministro de agua. Además, una planificación adecuada permite prolongar la vida útil de la infraestructura, minimizando el impacto de la sedimentación y maximizando el uso de los recursos hídricos disponibles. La evaluación periódica y el mantenimiento de los niveles de almacenamiento aseguran la resiliencia de la presa frente a cambios climáticos y eventos extremos.

2.2.2. Curvas características.

Figura 2.5. Planimetría tipo de un embalse.



Fuente: Elaboración propia.

La principal función de los vasos es almacenar agua, por lo que su característica física más relevante es la capacidad de almacenamiento. Esta capacidad se calcula generalmente usando fórmulas que relacionan las áreas con los volúmenes de sólidos. En sitios naturales, la capacidad del vaso se determina a partir de levantamientos topográficos.

La capacidad de un embalse depende principalmente de la topografía del vaso, para su cálculo, es necesario determinar sus curvas características, es decir: la curva altura-volumen y altura-superficie.

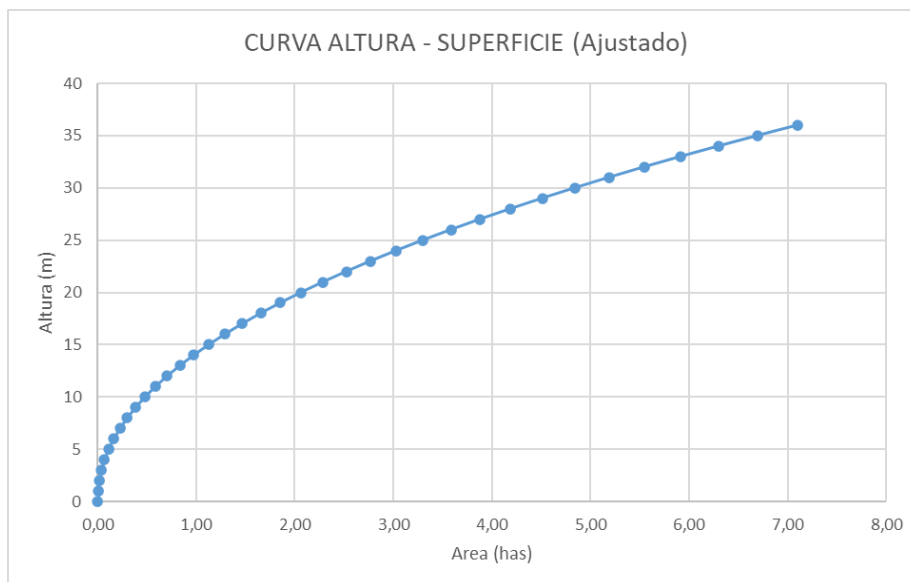
Para determinar estas curvas se requiere:

- Información topográfica del vaso consistente en un plano topográfico a detalle.
- Curvas de nivel cada metro o mayor (dependiendo de la magnitud del proyecto y del nivel de precisión requerido).

2.2.2.1. Curva altura - superficie.

Es la representación gráfica de puntos de las cotas o alturas en función de la superficie.

Figura 2.6. Ejemplo de curva Altura – superficie.

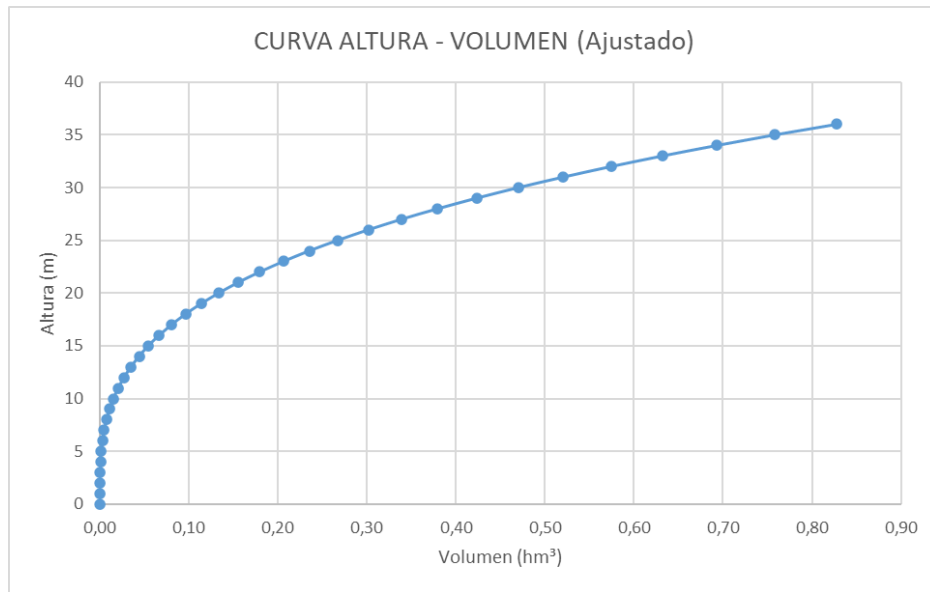


Fuente: Elaboración propia.

2.2.2.2. Curva altura - volumen.

Representa el volumen almacenado acumulado correspondiente a cada elevación. Se la obtiene calculando los volúmenes de agua entre cada dos curvas de nivel consecutivas del vaso (integración de la curva altura-superficie).

Figura 2.7. Ejemplo de curva Altura – Volumen.



Fuente: Elaboración propia.

El volumen parcial entre curvas se puede determinar asumiendo que se forma un tronco pirámide entre dos curvas consecutivas, a continuación, se detalla la formula a utilizar.

$$V_i = \frac{h}{3} \cdot (A_i + A_{i+1} + \sqrt{A_i \cdot A_{i+1}})$$

Donde:

V_i = Volumen parcial entre curvas [m³].

h = Equidistancia entre curvas [m].

A_i = Área de la curva menor [m²].

A_{i+1} = Área de la curva mayor [m²].

Dichos puntos, es necesario ajustar a una ecuación de tipo potencial o exponencial, según el grado de precisión. La ecuación ajustada, permitirá encontrar de manera rápida el volumen almacenado a una determinada altura.

2.3. Regulación de embalses.

Las presas de almacenamiento y regulación son infraestructuras críticas en la gestión de recursos hídricos, diseñadas para almacenar los excedentes de agua durante períodos de alto escurrimiento y liberarlos durante las épocas de escasez. Este proceso de manejo y

redistribución del agua almacenada, conocido como "regulación", es esencial para satisfacer diversas demandas como el suministro de agua potable, riego, generación de energía hidroeléctrica, y otros usos industriales y recreativos. La regulación de embalses no solo optimiza la utilización del agua disponible según las demandas establecidas, sino que también permite estabilizar las variaciones estacionales en la oferta hídrica de una cuenca, garantizando un suministro más predecible y controlado.

2.3.1. Objetivos de la regulación de embalses

- **Ajuste temporal de recursos y usos:** La regulación busca equilibrar temporalmente la relación entre las aportaciones naturales y las demandas hídricas, asegurando que el agua esté disponible cuando y donde se necesite.
- **Laminación de crecidas o avenidas:** Mediante la regulación, se pueden controlar los flujos máximos que salen del embalse, reduciendo el riesgo de inundaciones aguas abajo durante eventos de crecida, protegiendo así tanto a las poblaciones como a las infraestructuras.
- **Establecimiento de la oferta hídrica anual:** La regulación permite definir una oferta hídrica estable a lo largo del año, independientemente de las variaciones naturales en la precipitación y el escurrimiento. Esto es crucial para la planificación y el manejo sostenible de los recursos hídricos.

2.3.2. Escalas de operación.

- **Operación Diaria:** En esta escala temporal, se utilizan balsas y depósitos de regulación para gestionar los flujos de agua de manera más inmediata. La operación diaria se centra en ajustar las liberaciones de agua para satisfacer las demandas fluctuantes a corto plazo, como la demanda de agua potable o el riego.
- **Operación Anual o Hiperaunal:** La operación en esta escala se refiere a la planificación y manejo a largo plazo del embalse. Implica decisiones estratégicas sobre la cantidad de agua que se debe almacenar o liberar en diferentes estaciones, teniendo en cuenta factores como la previsión climática, la demanda esperada y la recarga del embalse.

2.3.3. Procedimiento para la regulación y operación de un embalse.

2.3.3.1. Recolección de datos.

- **Datos hidrológicos:** Se debe recopilar datos históricos de caudales de entrada (aportaciones) y precipitación en la cuenca. Estos datos incluirán series temporales de caudales diarios, mensuales o anuales, así como información sobre eventos extremos, como crecidas o sequías.
- **Datos climáticos:** Es necesario obtener datos climáticos como temperatura, humedad, velocidad del viento y radiación solar, esenciales para calcular la evaporación desde el embalse.
- **Demanda de agua:** Se deben definir las demandas de agua para diferentes usos (agua potable, riego, hidroelectricidad, etc.) a lo largo del año, identificando las fluctuaciones estacionales.
- **Características del embalse:** Se recopilará información sobre las características físicas del embalse, como la capacidad de almacenamiento, el área del espejo de agua y las curvas de área-volumen-altura.

2.3.3.2. Análisis preliminar.

Balance hídrico preliminar: Se realizará un balance hídrico básico para estimar la disponibilidad de agua en el embalse, considerando las entradas (precipitación, escorrentía, trasvases) y las salidas (demanda, evaporación, infiltración, caudal ecológico).

$$\text{Balance Hídrico} = (\text{Entradas} + \text{Volumen Inicial}) - \text{Salidas}$$

Curva de operación del embalse: Se desarrollará una curva de operación preliminar que relacione el volumen almacenado en el embalse con la altura del agua y las diferentes etapas de operación (llenado, operación normal, descarga de excedentes).

2.3.3.3. Modelado y simulación.

Modelado de aportaciones y demandas: Se utilizarán modelos hidrológicos para simular los caudales de entrada al embalse bajo diferentes escenarios climáticos y de uso de suelo. Se modelarán también las demandas de agua, considerando las variaciones estacionales y posibles incrementos futuros.

Simulación de escenarios: Se realizarán simulaciones para diferentes escenarios de operación, incluyendo años húmedos, secos y medios. Se evaluará cómo se comporta el embalse bajo cada escenario en términos de llenado, vaciado y capacidad para satisfacer las demandas.

2.3.3.4. Cálculo de evaporación e infiltración.

Evaporación: La evaporación en embalses se puede estimar utilizando la fórmula de Penman u otras metodologías adecuadas, tomando en cuenta los datos climáticos disponibles. Sin embargo, en situaciones donde la información meteorológica es limitada o no incluye variables necesarias como radiación solar o velocidad del viento, el uso de evaporímetros se convierte en una alternativa práctica y efectiva. Los evaporímetros permiten medir directamente la cantidad de agua evaporada desde una superficie específica, proporcionando una estimación confiable de la evaporación en el embalse cuando los métodos teóricos no pueden aplicarse por falta de datos. Esta técnica es especialmente útil en zonas remotas o en embalses donde la variabilidad climática es significativa y se necesita una evaluación continua y precisa de las pérdidas por evaporación.

Infiltración: La infiltración se estima con base en ensayos de permeabilidad o a partir del balance hídrico residual (diferencia entre entradas y salidas no explicadas por otros procesos).

2.3.3.5. Establecimiento del caudal ecológico.

En Bolivia, el caudal ecológico resulta un parámetro difícil de estimar, sin embargo, la condición principal que debe cumplir es que mantenga la sostenibilidad ambiental aguas abajo del punto de emplazamiento de la presa. Las “Guías para la elaboración de estudios de diseño técnico de preinversión para proyectos de riego (menores, medianos y mayores)” elaborado por el Ministerio de Medio Ambiente y Agua y el Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego (2018); menciona lo siguiente:

Así mismo, se deberá establecer el caudal ecológico, en base a recomendaciones de las prácticas de análisis para la conservación ambiental, o un mínimo de 10% del caudal medio de cada mes.

Las metodologías existentes para determinar caudales ecológicos son numerosas a nivel mundial. Sin embargo, las más aceptadas se pueden agrupar en los siguientes enfoques y/o métodos:

1) Hidrológicos.

Esta metodología considera que los organismos de las comunidades ribereñas están adaptados a las variaciones estacionales propias de un régimen hídrico. Estas variaciones naturales afectan el comportamiento, los ciclos biológicos y la producción biológica de las poblaciones.

2) Hidráulicos o Valoración Hidráulica.

Se considera que variables hidráulicas simples como el perímetro mojado o la profundidad máxima, juegan como factores limitantes en la biota. Estos métodos, generalmente, se basan en estudios de una sección transversal de un río, para así relacionar la magnitud de la descarga con la profundidad de los cauces, velocidad y perímetro mojado.

3) Hidrobiológico o de simulación de hábitat.

Las especies de peces están mejor adaptadas a ciertas características hidráulicas, estructurales y geomorfológicas. Al conocer cómo afecta el caudal a estas características, se puede predecir el caudal óptimo para mantener las poblaciones de estos peces.

4) Holísticos.

Estos métodos asumen que, si son identificadas las características esenciales del flujo hídrico que pueden generar un impacto ecológico y son incorporadas dentro de un régimen de flujo modificado, entonces la biota y la integridad funcional del ecosistema será mantenida. Los métodos holísticos, generalmente, tienen dos aproximaciones distintas o combinan estas dos (Arthington et al. 1998).

2.3.3.6. Desarrollo de un plan de operación.

Operación diaria: Se establecen los volúmenes de agua a liberar diariamente para satisfacer la demanda inmediata, respetando las prioridades de uso y asegurando el caudal ecológico.

Operación anual: Se define las estrategias de almacenamiento y liberación a lo largo del año, priorizando el llenado del embalse en la temporada de lluvias y planificando la liberación gradual durante la temporada seca para evitar la escasez.

2.3.4. Importancia de la regulación de embalses

- **Optimización del uso del agua:** La regulación permite un uso más eficiente del recurso hídrico, minimizando el desperdicio y maximizando los beneficios económicos y sociales.
- **Protección contra inundaciones:** Al regular los caudales, los embalses pueden reducir significativamente el impacto de las crecidas, protegiendo tanto a las poblaciones como a la infraestructura aguas abajo.
- **Seguridad hídrica:** La regulación asegura una disponibilidad constante de agua, incluso en épocas de sequía, lo que es esencial para la seguridad hídrica de las comunidades.
- **Sostenibilidad ambiental:** Al garantizar un flujo ecológico mínimo, la regulación contribuye a la preservación de los ecosistemas acuáticos y al mantenimiento de la biodiversidad.

2.3.5. Otros aspectos relevantes.

- **Impacto del cambio climático:** La regulación de embalses debe adaptarse a las nuevas realidades impuestas por el cambio climático, que afecta tanto las precipitaciones como los patrones de escurrimiento. Esto requiere una planificación flexible y el uso de modelos predictivos para ajustar la operación de los embalses.
- **Tecnología y monitoreo:** La implementación de tecnologías avanzadas para el monitoreo en tiempo real y la modelación hidrológica es clave para mejorar la eficiencia de la regulación de embalses. Estos sistemas permiten una respuesta más rápida y precisa a las condiciones cambiantes.
- **Gestión integrada de recursos hídricos (GIRH):** La regulación de embalses debe ser parte de una estrategia más amplia de gestión integrada de los recursos hídricos, que considere no solo el agua almacenada sino también las interacciones con otros usos del suelo, la calidad del agua, y los impactos socioeconómicos.

2.4. Modelación hidrológica.

La modelación hidrológica es una disciplina que integra conocimientos de diversas áreas para representar de manera matemática el comportamiento de un sistema hidrológico. Este proceso involucra la creación de ecuaciones que describen los procesos físicos relacionados con la ocurrencia, circulación y distribución del agua en una cuenca hidrográfica. Al utilizar modelos matemáticos, la modelación hidrológica permite a los investigadores y gestores entender y prever la dinámica del ciclo hidrológico, facilitando la simulación de condiciones bajo diferentes escenarios.

2.4.1. Definición.

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

También se puede definir como la aplicación de expresiones matemáticas y lógicas para definir cuantitativamente las relaciones entre las escorrentías (salidas) y los factores que forman la escorrentía (entradas).

2.4.2. Objetivos de la modelación hidrológica.

En el contexto de gestión e intervención sobre la infraestructura natural, la modelación hidrológica se utiliza con tres objetivos:

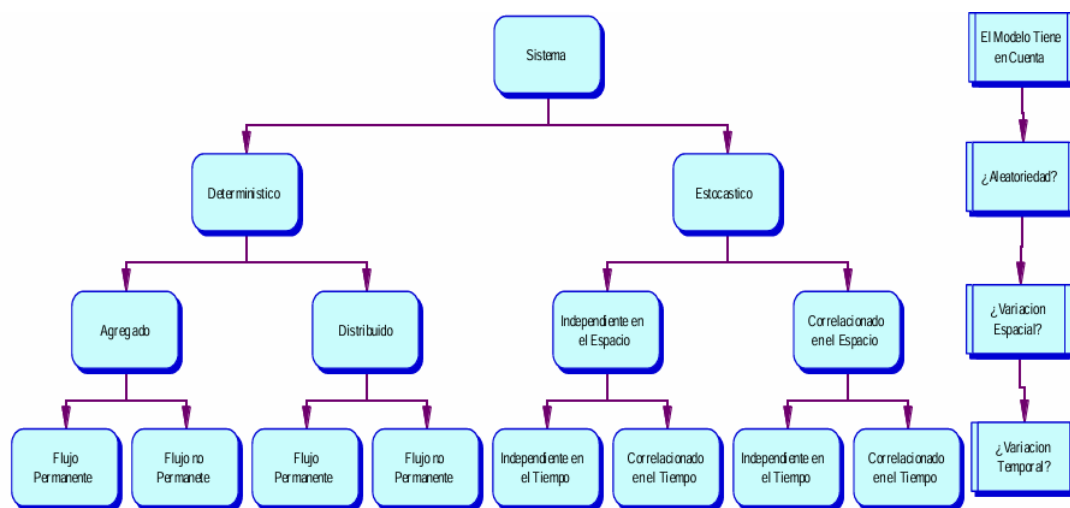
- a) Entender los procesos de un sistema hidrológico.
- b) Hacer predicciones hidrológicas con base en escenarios definidos.
- c) Apoyar y robustecer la generación de datos e información.

Por un lado, los modelos hidrológicos se utilizan para probar algunas hipótesis sobre el funcionamiento del sistema, al intentar extrapolar un conjunto de mediciones y observar si la respuesta hidrológica responde a una estructura específica del modelo; por otro lado, permiten simular cómo reaccionaría el sistema ante escenarios específicos como el cambio climático, el cambio de usos del suelo o la implementación de intervenciones sobre la infraestructura natural; por último, requieren datos y observaciones en campo, a fin de ser calibrados y validados (B. F. Ochoa-Tocachi, 2022).

2.4.3. Tipos de modelos.

El modelo puede localizarse en un árbol de acuerdo con las alternativas, tal como se muestra en la Figura 2.5.

Figura 2.8. Clasificación de modelos hidrológicos en función: la forma, la aleatoriedad, variación espacial y temporal de los fenómenos hidrológicos.



Fuente: Material de apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura de hidrología CIV-233, A. Cahuana Andia.

Primero, se toma en cuenta la aleatoriedad, según esta clasificación puede ser determinístico o estocástico. Los procesos hidrológicos son parcialmente determinísticos y parcialmente aleatorios o estocásticos.

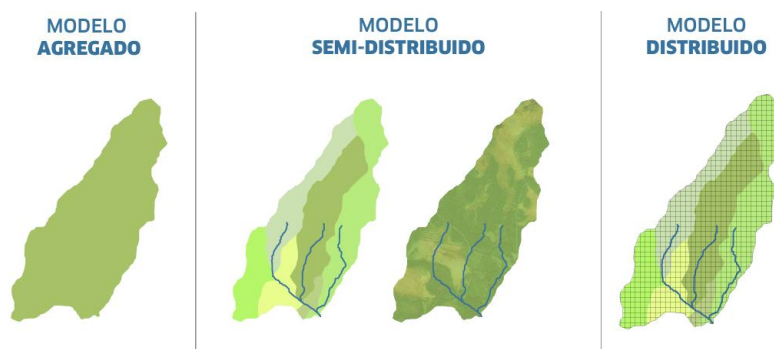
Un modelo determinístico no considera aleatoriedad; una entrada dada produce siempre una misma salida. Un modelo estocástico tiene salidas que son por lo menos parcialmente aleatorias. Podría decirse que los modelos determinísticos hacen pronósticos, mientras que los modelos estocásticos hacen predicciones. A pesar de que todos los fenómenos hidrológicos implican algún grado de aleatoriedad, la variabilidad resultante en la salida puede ser pequeña cuando se le compara con la variabilidad resultante de otros factores conocidos. En tales casos un modelo determinístico es apropiado. Si la variación aleatoria es grande, un modelo estocástico es el más adecuado, porque la salida real podría ser bastante diferente del valor único producido por un modelo determinístico (V. Te Chow, 2000)

2.4.4. Clasificación de modelos.

Los modelos hidrológicos se clasifican de acuerdo con su discretización espacial en modelos:

- **Modelos Agregados:** Representa la respuesta efectiva de la cuenca entera por lo que emplea información homogénea para todo el modelo.
- **Modelo Semi-distribuido:** Combinación de aspectos de los modelos agregados y distribuidos. Se divide en subcuencas agrupadas como unidades hidrológicas de análisis donde los parámetros son homogéneos para cada unidad específica.
- **Modelo Distribuido:** Representa explícitamente la variabilidad espacial de las características superficiales de la cuenca. Es representada por mallas de celdas detalladas de la región.

Figura 2.9. Discretización de modelos a escala espacial: agregados, semi-distribuidos y distribuidos.



Fuente: Guía de modelación hidrológica para la infraestructura natural, B. F. Ochoa-Tocachi.

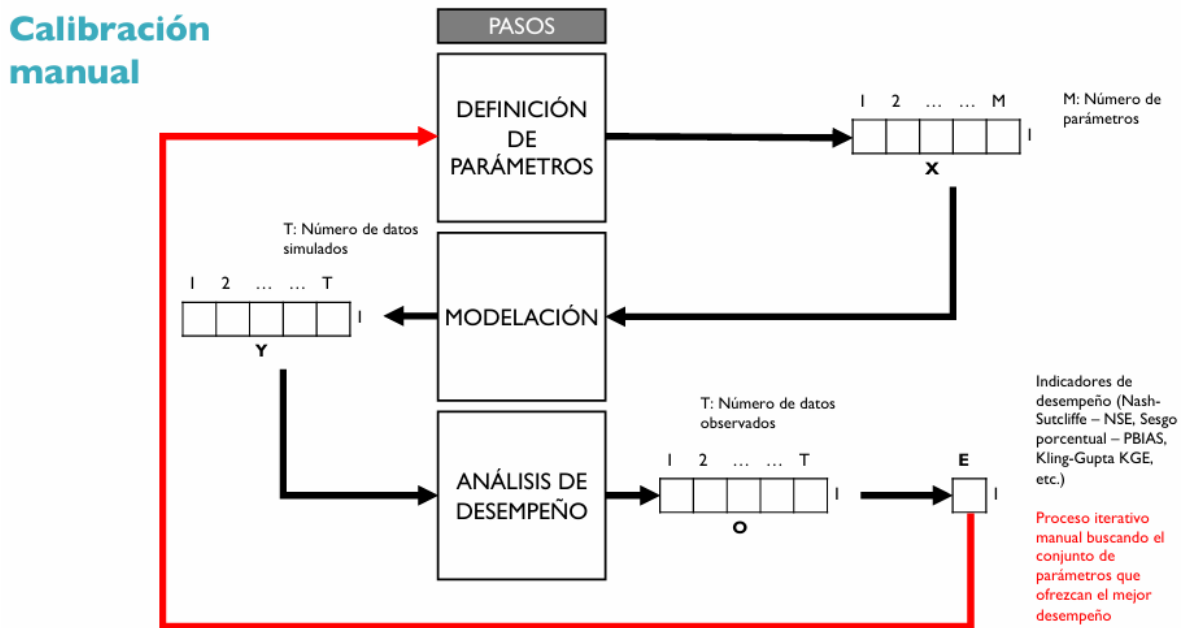
2.4.5. Calibración y validación de modelos.

La calibración es un proceso de ensayo y error donde se prueba una configuración de parámetros del modelo y se contrastan los resultados frente a una lista de datos observados y considerados como reales. Este proceso consiste en tres pasos principales: 1) la definición de los parámetros de entrada; 2) la modelación con base en dichos parámetros para generar resultados; y 3) el análisis de desempeño de los resultados (B. F. Ochoa-Tocachi, 2022).

2.4.5.1. Calibración Manual.

En la calibración manual, se seleccionan M parámetros clave que se ingresan en el modelo, y cuya sensibilidad se analiza en una subsección posterior. Estos parámetros generan un conjunto de resultados de longitud T (por ejemplo, el número de meses simulados). Los resultados simulados se comparan con datos observados mediante indicadores como la eficiencia de Nash-Sutcliffe o el sesgo porcentual. Si el desempeño no es satisfactorio, se ajustan los parámetros y se repite el proceso, lo que puede ser laborioso y no siempre lleva a un resultado óptimo. Para optimizarlo, se prefiere una calibración automática.

Figura 2.10. Proceso de calibración manual de un modelo de simulación.



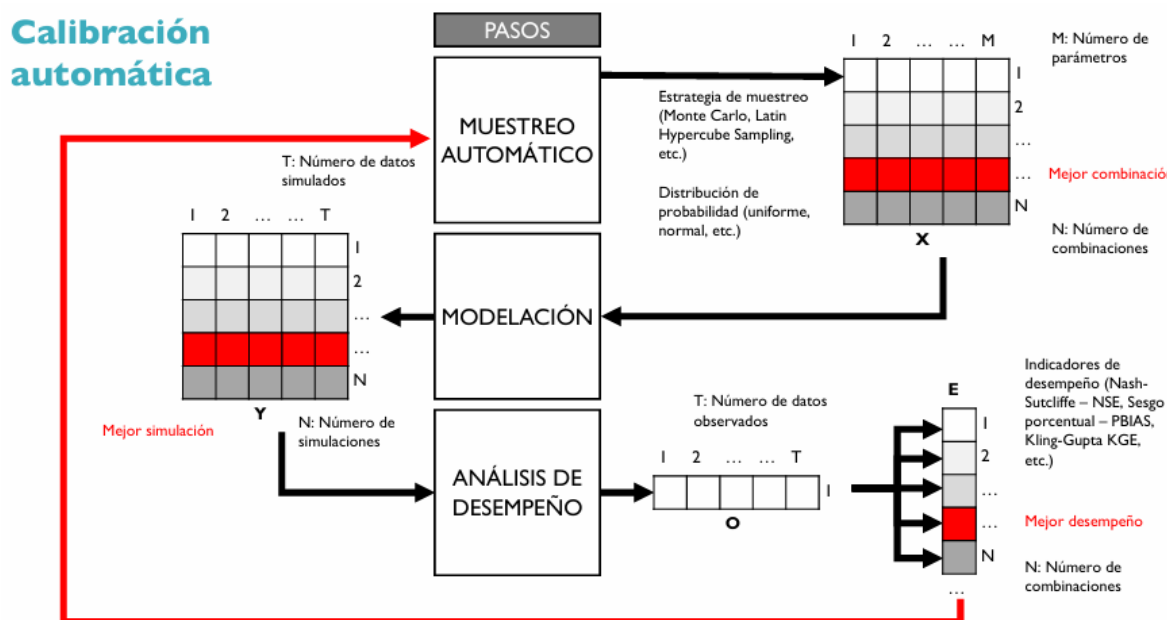
Fuente: Guía de modelación hidrológica para la infraestructura natural, B. F. Ochoa-Tocachi.

2.4.5.2. Calibración automática.

En una calibración automática, el proceso de muestreo produce no solo una combinación de parámetros, sino cientos o miles de combinaciones únicas de parámetros. Este muestreo se genera siguiendo una estrategia estadística formal —por ejemplo, Monte Carlo o muestreo hipercubo latino— y asumiendo una distribución de probabilidad para cada parámetro. El resultado es una matriz X de dimensiones $N \times M$, donde N es el número de combinaciones individuales y M es el número de parámetros (B. F. Ochoa-Tocachi, 2022).

La matriz X de parámetros se ingresa en el modelo, generando N conjuntos de resultados, uno por cada combinación de parámetros. Esto produce una matriz Y de dimensiones N x T, donde T es el número de datos generados. La matriz Y se analiza para evaluar el desempeño frente a los datos observados, obteniendo una matriz E de dimensiones N x L, donde L es el número de indicadores evaluados. De estos resultados, se identifica la combinación de parámetros con el mejor desempeño, lo que hace que el proceso sea N veces más eficiente que la calibración manual, pudiendo arrojar resultados óptimos en una sola ejecución.

Figura 2.11. Proceso de calibración automática de un modelo de simulación.



Fuente: Guía de modelación hidrológica para la infraestructura natural, B. F. Ochoa-Tocachi.

2.4.5.3. Evaluación de desempeño.

Existen varios indicadores que pueden servir para medir el desempeño de las simulaciones. Los indicadores identificados aquí son funciones objetivo ampliamente usadas de los modelos hidrológicos:

Tabla 2.1. Medidas estadísticas incorporadas en WEAP.

Medida estadística	Valores ideales y aceptables	Interpretación
Coefficiente de correlación de Pearson, r	Si $r = 1$ existe una relación lineal positiva perfecta.	Describe el grado de colinealidad entre los datos simulados y medidos.
Coefficiente de determinación de Pearson, r^2	El valor ideal es 1, los valores de 0,5 a 1 se consideran aceptables.	Es un índice del grado de relación lineal entre los datos observados y simulados.
Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE)	El valor ideal es 1, valores: > 0,5 = aceptable. > 0,6 = deseado. > 0,7 = bueno. > 0,8 = muy bien.	Qué tan bien el caudal modelado coincide con el caudal observado.
NSE en registro de flujo diario transformado (LNS)	El valor ideal es 1.	Igual que NSE, pero con sensibilidad reducida a valores altos y bajos.
Eficiencia Kling-Gupta (KGE)	El valor ideal es 1. Los valores deseados están por encima de 0,8.	Compila tres métricas: correlación de valores simulados y observados, sesgo del modelo y simulación de variaciones de caudal.
Error medio (MAE)	0 indica un ajuste perfecto, un valor inferior a la mitad de una desviación estándar se considera aceptable.	El grado en que los flujos modelados y observados coinciden
Error cuadrático medio (RMSE)		
Error cuadrático medio normalizado (NRMSE)		
Relación entre el error cuadrático medio y la desviación estándar (RSR)	Un valor ideal es cero, pero los valores inferiores a 0,7 se consideran buenos.	Una medida de cuánto se desvían los flujos simulados de los hidrogramas observados
Porcentaje de sesgo (PBIAS)	Un valor ideal es cero, pero se considera aceptable un PBias de más o menos el 25 %.	Tendencia de sobreestimación o subestimación constante de los flujos/coincidencia del volumen total simulado con el observado

Fuente: Tutorial, Stockholm Environment Institute.

A continuación, se describe a más detalles algunas medidas:

El coeficiente **de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE)** se usa comúnmente en el modelado hidrológico para evaluar qué tan bien el caudal modelado coincide con el caudal observado. El valor ideal es 1, los valores de 0,5 son aceptables, pero la mayoría de los modeladores apuntan a valores que están en o por encima de 0,7 (Stockholm Environment Institute, 2023).

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - \overline{Q^{obs}})^2} \right]$$

La eficiencia de Kling-Gupta (KGE) es un indicador que tiene como objetivo capturar tres objetivos diferentes de calibración del modelo: correlación de valores simulados y observados, minimización del sesgo del modelo y simulación óptima de variaciones de flujo. El valor ideal es 1, se desean valores superiores a 0,8 (Stockholm Environment Institute, 2023).

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + \left(\frac{\overline{Q^{sim}}}{\overline{Q^{obs}}} - 1\right)^2}$$

El sesgo porcentual (PBIAS) es una medida de la capacidad del modelo para igualar el volumen total de flujo. Un valor ideal es cero, pero se considera aceptable un PBias de más o menos el 25 % del caudal observado (Stockholm Environment Institute, 2023).

$$PBIAS = 100 * \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs})} \right]$$

La proporción de la El error cuadrático medio de la desviación estándar (RSR) es una medida de cuánto se desvían los flujos simulados de los hidrogramas observados. Un valor ideal es cero, pero los valores inferiores a 0,7 se consideran aceptables (Stockholm Environment Institute, 2023).

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \frac{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})^2} \right]}{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - \overline{Q^{obs}})^2} \right]}$$

El coeficiente de correlación de Pearson (r) es un índice del grado de relación lineal entre los datos observados y simulados. Va de -1 a 1 . Si $r = 0$, no existe una relación lineal. Si $r = 1$ o -1 , existe una relación lineal positiva o negativa perfecta (Stockholm Environment Institute, 2023).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{o(i)} - \overline{Q^{obs}})(Q_i^{sim} - \overline{Q^{sim}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - \overline{Q^{obs}})^2 * \sum_{i=1}^n (Q_i^{sim} - \overline{Q^{sim}})^2}}$$

El coeficiente de determinación de Pearson (r^2) también compara datos simulados y medidos; describe la proporción de la varianza en los datos medidos explicada por el modelo. r^2 varía de 0 a 1 , donde los valores más altos indican una menor varianza del error y, por lo general, los valores superiores a $0,5$ se consideran aceptables (Stockholm Environment Institute, 2023).

$$r^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{o(i)} - \overline{Q_{o(i)}})(Q_{c(i)} - \overline{Q_{c(i)}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{o(i)} - \overline{Q_{o(i)}})^2 * \sum_{i=1}^n (Q_{c(i)} - \overline{Q_{c(i)}})^2}} \right]^2$$

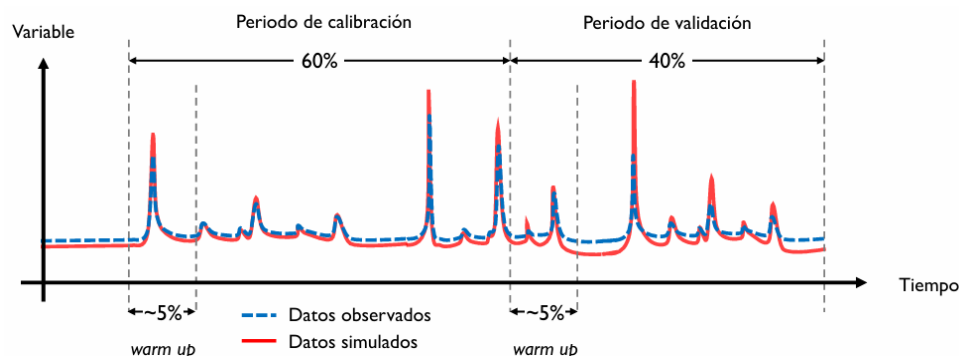
2.4.5.4. Validación.

Finalmente, aunque la calibración del modelo consiste en ajustar sistemáticamente los valores de sus parámetros, la validación se utiliza para evaluar la fiabilidad de los resultados obtenidos, es decir, para medir el rendimiento del modelo ya calibrado. Normalmente, la validación se lleva a cabo en un periodo diferente al de la calibración. Por ejemplo, en la calibración y validación de un modelo de caudal, es común utilizar la estación hidrológica ubicada en la parte más baja o en el cierre de la cuenca modelada.

De acuerdo con recomendaciones de Klemesš (1986), la separación del periodo de datos diarios disponible para el estudio (serie de datos pequeña) corresponderá al 60% para calibración y al 40% para validación, independientemente de la serie de caudal que se use (Figura 28). Es importante que la serie temporal muestre la existencia de un periodo húmedo y un periodo seco. Al inicio de la ejecución del modelo, se descarta un periodo de calentamiento (“warm up”). Luego de este periodo, las variables de salida del modelo se

vuelven independientes o atenúan su efecto en razón de las condiciones iniciales asumidas (B. F. Ochoa-Tocachi, 2022).

Figura 2.12. División de la serie de tiempo en periodos de calibración y validación y periodos de calentamiento (warm up).



Fuente: Guía de modelación hidrológica para la infraestructura natural, B. F. Ochoa-Tocachi.

2.4.6. Modelación WEAP.

WEAP es una herramienta de modelación para la planificación y distribución de agua que puede ser aplicada a diferentes escalas, desde pequeñas zonas de captación hasta extensas cuencas. WEAP tiene una amplia base de usuarios en todo el mundo y está disponible en diferentes idiomas, incluido el español (Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile, Stockholm Environment Institute, 2009).

2.4.6.1. Descripción y aplicaciones de WEAP.

WEAP es una plataforma avanzada para la gestión de recursos hídricos que combina la modelación hidrológica con el análisis de demanda. A través de su interfaz gráfica, los usuarios pueden evaluar cómo variables como el clima, las condiciones de la cuenca y las infraestructuras existentes afectan la disponibilidad y distribución del agua. Es especialmente útil en estudios de cambio climático, permitiendo proyectar cómo variaciones en la precipitación y la demanda, como la evaporación en cultivos, podrían alterar el balance hídrico de una cuenca.

Además de su capacidad para modelar la oferta y demanda de agua, WEAP facilita la optimización de la distribución hídrica mediante un algoritmo de programación lineal. Este enfoque considera las prioridades de demanda, las características de los embalses y las

regulaciones ambientales, lo que garantiza una gestión eficiente de los recursos. WEAP también permite realizar simulaciones que integran diferentes escenarios, ayudando a los planificadores a tomar decisiones informadas sobre la operación de infraestructuras y el cumplimiento de objetivos regulatorios.

2.4.6.2. Proceso de aplicación de un modelo WEAP.

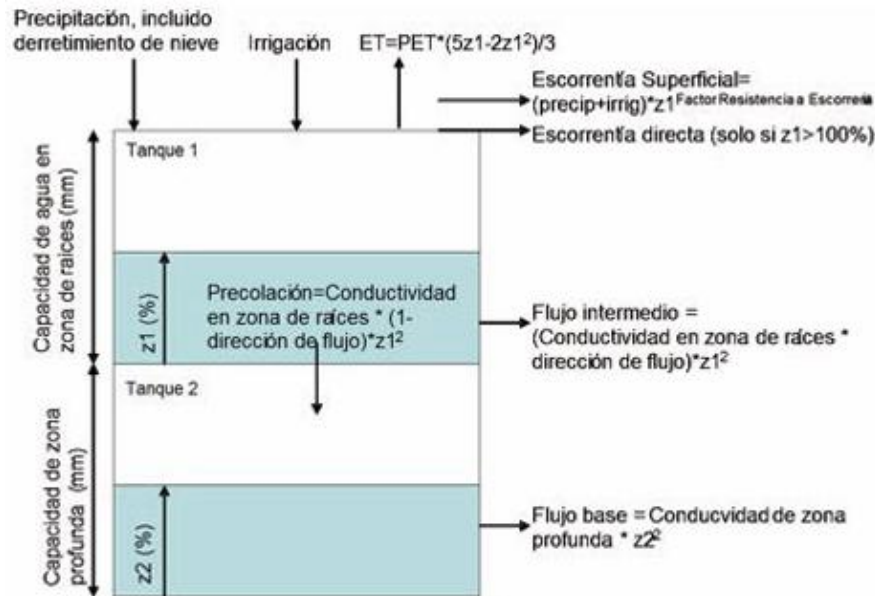
Según la guía de modelación de WEAP, contempla las siguientes etapas:

- 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) Búsqueda 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.
- 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.
- 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.
- 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 7 políticas futuras, costos, y clima, por ejemplo, en la demanda de agua, oferta de agua, hidrología y contaminación.

2.4.6.3. Hidrología de superficie – WEAP.

El modelo hidrológico de WEAP, Soil Moisture (Figura 2.10), es un modelo unidimensional que se basa en la noción de transferencia de agua entre dos baldes: un balde superior que representa la zona de raíces, y un balde inferior que representa la interacción con el acuífero. En estos dos baldes se representa la dinámica entre la evapotranspiración, escurrimiento superficial, subsuperficial y percolación para cada cuenca o subcuencas que es denominada como “catchments” esta se divide en varios elementos N de acuerdo con una característica específica.

Figura 2.13. Esquema para dos reservorios, balde superior y balde inferior.



Fuente: Balance Hídrico de Bolivia 1980 – 2020, MMAyA.

El balance hídrico es calculado en cada fracción de uso o cobertura j de las X áreas fraccionales (reservorios horizontales) 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 (Yates et al., 2005):

$$Sw_j \cdot \frac{dh_{1,j}}{dt} = P_e(t) - ET(t) - Qs(t) - Qss(t) - Qp(t)$$

Donde:

Sw_j: estimado de la capacidad efectiva de almacenamiento de agua en el suelo para cada j .

h_{1,j}: almacenamiento relativo de agua en el suelo, representa una fracción del total, de almacenamiento efectivo en el reservorio "1", varía entre 0 (punto de marchitez permanente) y 1 (capacidad de campo).

P_e(t): Precipitación efectiva total acumulada en el paso de tiempo t .

ET: Evapotranspiración.

Qs: Escorrentía superficial.

Qss: Escorrentía subsuperficial.

Qp: Percolación profunda.

La siguiente ecuación presenta la expresión desarrollada por (Yates et al., 2005), donde RRF [adimensional] (Figura 2.10) es el factor de resistencia al escurrimiento, con los valores más bajos relacionados a las tasas más altas de escurrimiento superficial (suelos sin cobertura vegetal). En la formulación original, RRF era el índice de área foliar LAI. ks_j [L/T] es un estimado de la conductividad saturada en el reservorio superficial. f_j [adimensional] es un parámetro de calibración relacionado al tipo de suelo, cobertura y topografía, que define la proporción que escurre horizontalmente (f_j) o verticalmente ($1 - f_j$):

$$Sw_j \frac{dh_{1,j}}{dt} = P_e(t) - ETo(t) K_{c,j}(t) \left(\frac{5h_{1,j} - 2h_{1,j}^2}{3} \right) - P_e(t) h_{1,j}^{RRF_j} - f_j ks_j h_{1,j}^2 - (1 - f_j) ks_j h_{1,j}^2$$

Para cuantificar la suma de los aportes de Q_s y Q_{ss} desde el reservorio "1" en cada subcuenca de área A_j , la expresión para la variable resultante Q_1 es:

$$Q_1(t) = \sum_{j=1}^N A_j [P_e(t) h_{1,j}^{RRF_j} + f_j ks_j h_{1,j}^2]$$

En aplicaciones donde se asume que no existe recarga hacia el nodo del acuífero, con ks_2 [L T⁻¹] representando la conductividad hidráulica en el reservorio "2" (valor constante para toda la cuenca, por lo que no incluye el subíndice j) (Figura 2.10), el caudal del reservorio subterráneo es (SEI, 2015):

$$Dw \frac{dh_2}{dt} = \sum_{j=1}^N (1 - f_j) ks_j h_{1,j}^2 - ks_2 h_2^2$$

donde Dw [L] es la percolación profunda desde el reservorio superficial. Luego, la aproximación a la descripción del flujo base Q_G se expresa:

$$Q_G(t) = \sum_{j=1}^N A_j (ks_2 h_2^2)$$

Para el caso de la cuenca situada aguas abajo, con recarga hacia el reservorio aluvial (nodo del acuífero), se omite el flujo desde el reservorio subterráneo ($ks_2 \cdot h_2^2$) y la recarga expresada por la percolación (Perc) [L³ T⁻¹] es (Yates, Sieber, Purkey, & Huber-Lee, 2005):

$$Perc = \sum_{j=1}^N A_j (1 - f_j) ks_j z_{1,j}^2$$

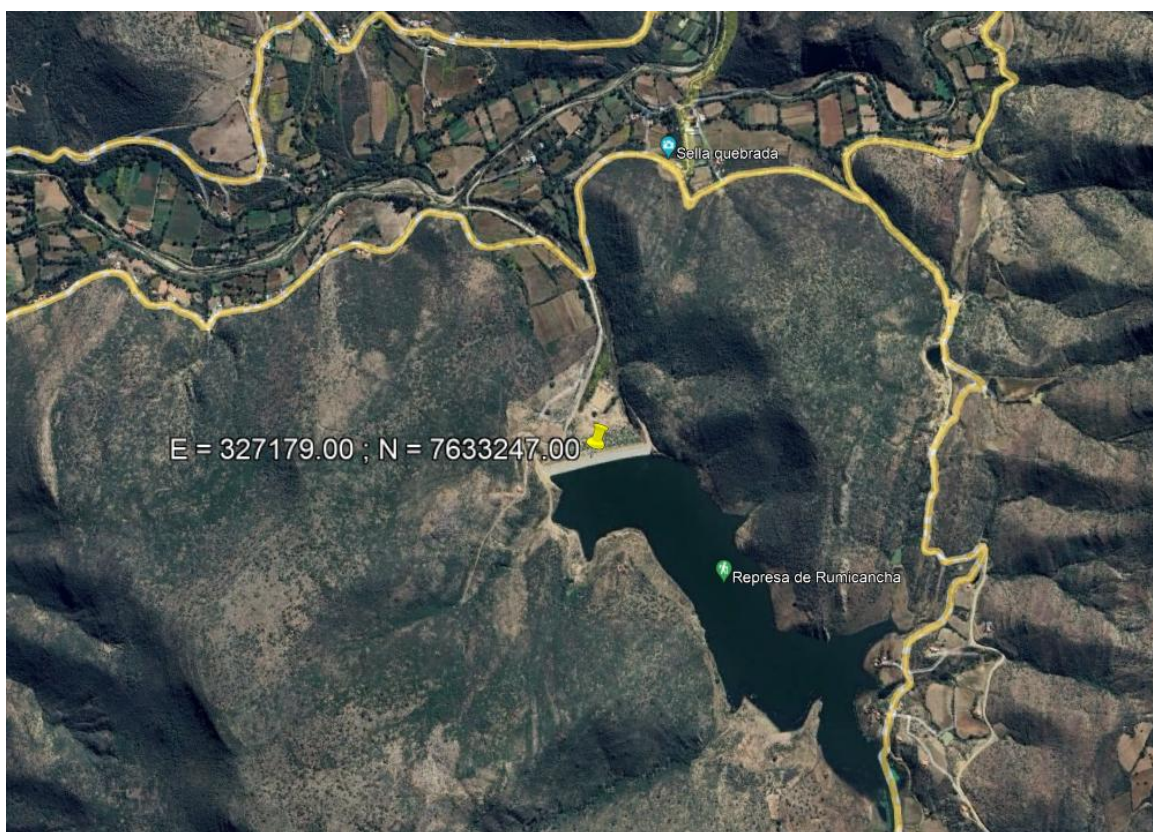
3. CAPÍTULO III : RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN.

3.1. Revisión de documentación existente.

3.1.1. Características técnicas de la presa “Sella – Rumicancha” contempladas en el estudio TESA.

La presa “Sella – Rumicancha” se encuentra ubicada dentro de los límites de la comunidad Rumicancha.

Figura 3.1. Vista satelital y coordenadas del eje de la presa “Sella – Rumicancha”.



Fuente: Google Earth.

Las características geométricas y de capacidad de almacenamiento de la presa Rumicancha son las siguientes:

- Altura = 41 m.
- Longitud de cierre de la presa = 314,44 m.
- Capacidad de almacenamiento total = 12.737.633,46 m³.
- Ancho de coronamiento = 11.2 m.

- Talud aguas arriba = 1.4 H, 1 V, talud aguas abajo = 1.6 H, 1 V.
- Volumen útil = 11.418.227,50 m³.
- Volumen muerto = 1.319.405,96 m³.

En la siguiente tabla se presenta los niveles característicos, los cuales fueron extraídos de la planilla de operación del embalse (a 50 años de operación):

Tabla 3.1. Niveles y volúmenes característicos del embalse, presentados en el estudio TESA.

DESCRIPCIÓN	VOLUMEN [m ³]	COTA [msnm]	ALTURA [m]
Nivel más bajo		2154,00	0
Nivel volumen muerto (NAM)	1 319 406,00	2167,90	13,90
Nivel obra de toma (NAMIN)	1 500 753,20	2168,90	14,90
Nivel volumen útil (NANE)	12 737 633,50	2193,50	39,50
Nivel máximo de crecida (NAME)		2195,00	41,00
Nivel de Coronamiento		2195,00	41,00

Fuente: ESTUDIO TESA: “CONSTRUCCIÓN PRESA SELLA – RUMICANCHA”.

A pesar de que estos datos se encuentran en el estudio TESA, existe otro documento anexo llamado “ESTABILIDAD RUMICANCHA”, el cual tiene las siguientes características del embalse “Sella – Rumicancha”:

Tabla 3.2. Características del Embalse “Sella – Rumicancha” presentado en documento anexo.

Característica	Magnitud	Unidad
Área de la cuenca de aporte:	29,51	km ²
Avenida máxima del rio afluente en 1000 años:	93,04	m ³ /s
Volumen total del embalse:	10 809 931,20	m ³
Volumen útil:	9 490 525	m ³
Volumen muerto:	1 319 405,96	m ³
Longitud del coronamiento:	314,44	m
Ancho del coronamiento:	11,20	m
Borde libre:	0,50	m
Altura total de la presa:	41,00	m
Talud aguas arriba:	1,5 H. : 1,0 V.	
Talud aguas Abajo:	1,4 H. : 1,0 V.	

Fuente: ESTUDIO TESA: “CONSTRUCCIÓN PRESA SELLA – RUMICANCHA”.

Donde se puede observar una variación en el volumen útil; el volumen muerto, niveles y alturas, sigue siendo el mismo.

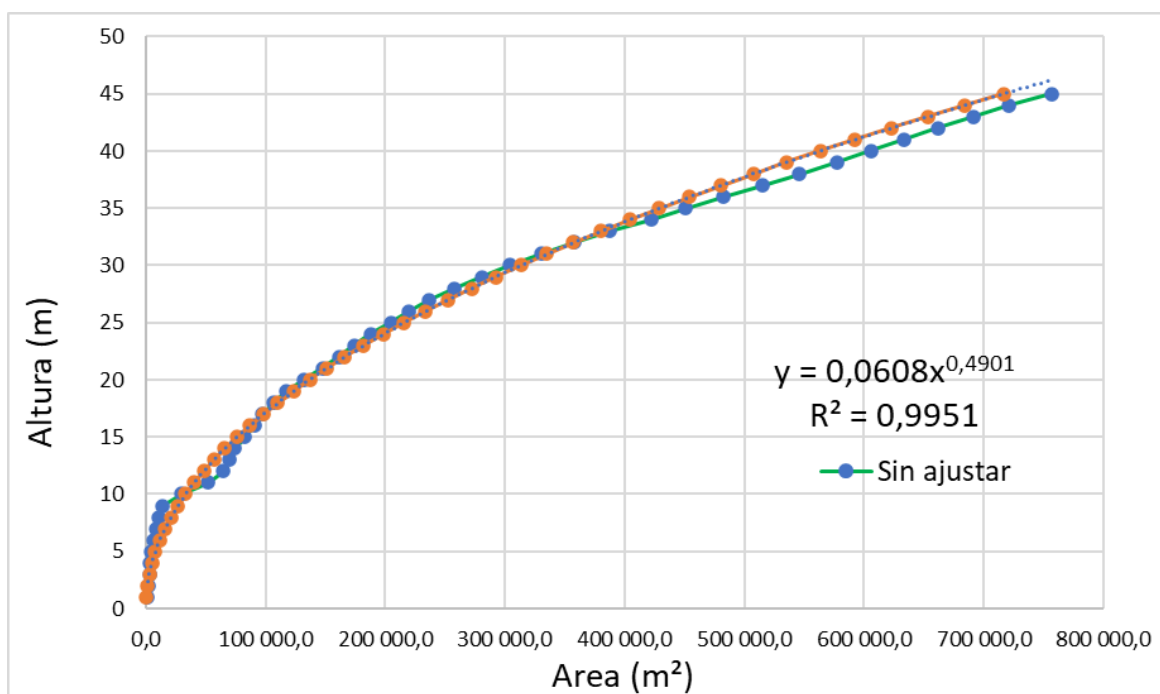
3.1.2. Características técnicas de la presa “Sella – Rumicancha” a partir de información proporcionada por SEDEGIA.

3.1.2.1. Volúmenes y niveles característicos del embalse “Sella – Rumicancha”

Debido a que el estudio TESA presenta 2 volúmenes útil, se acudió al Servicio Departamental de Gestión Integral del Agua (SEDEGIA), para solicitarle la información actual del embalse. Ante esta solicitud se entregó un plano en CAD que contiene el levantamiento topográfico del embalse, con estos datos se elaboró las curvas características del embalse.

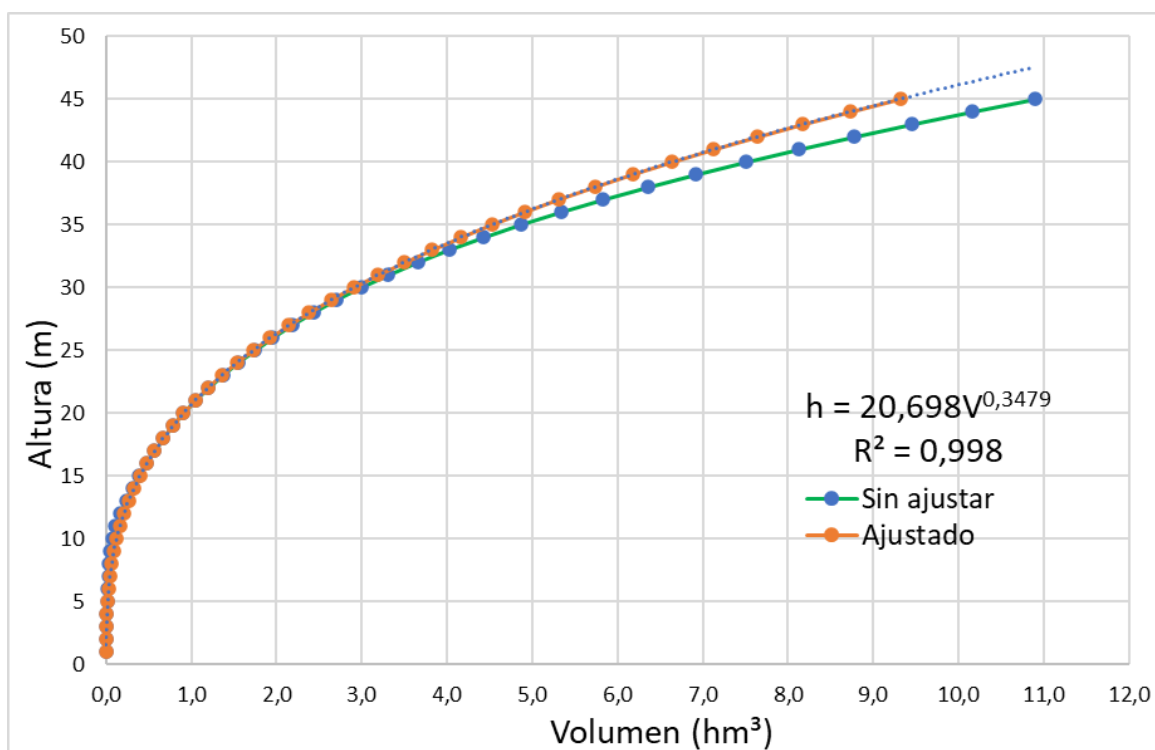
Con el plano de levantamiento topográfico en CAD, se ha extraído las áreas parciales entre curvas, con las cuales se elaboró las curvas características del embalse “Sella – Rumicancha”:

Figura 3.2. Curva Altura – Área: Embalse “Sella – Rumicancha”.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.3. Curva Altura – Volumen: Embalse “Sella – Rumicancha”.



Fuente: Elaboración propia.

También se proporcionó un documento elaborado por la constructora (Criterios para la operación del desfogue de fondo), el cual brinda información actualizada sobre los niveles y volúmenes característicos del embalse.

Tabla 3.3. Niveles y volúmenes acumulados del embalse “Sella – Rumicancha”, a partir de información proporcionada por SEDEGIA.

Descripción	Volumen acumulado [hm³]	Cota [msnm]	Altura [m]
Nivel de aguas máximas extraordinarias (NAME)	-	2196	46
Nivel de aguas máximas ordinarias (NAMO)	10,16	2194	44
Nivel de aguas mínimas de operación (NAMINO)	0,73	2168,5	18,5
Nivel de aguas mínimas (NAMIN)	0,07	2160	10
Nivel más bajo	0,00	2150	0

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.4. Volúmenes característicos del embalse “Sella – Rumicancha”, a partir de información proporcionada por SEDEGIA.

Descripción	Volumen [hm ³]	Volumen [m ³]
Volumen de superalmacenamiento	-	-
Volumen útil	9,44	9 439 931,43
Volumen mínimo de operación	0,66	655 101,25
Volumen muerto	0,07	69 913,09

Fuente: Elaboración propia.

3.1.2.2. Ubicación de la galería para el emplazamiento del desfogue de fondo y riego.

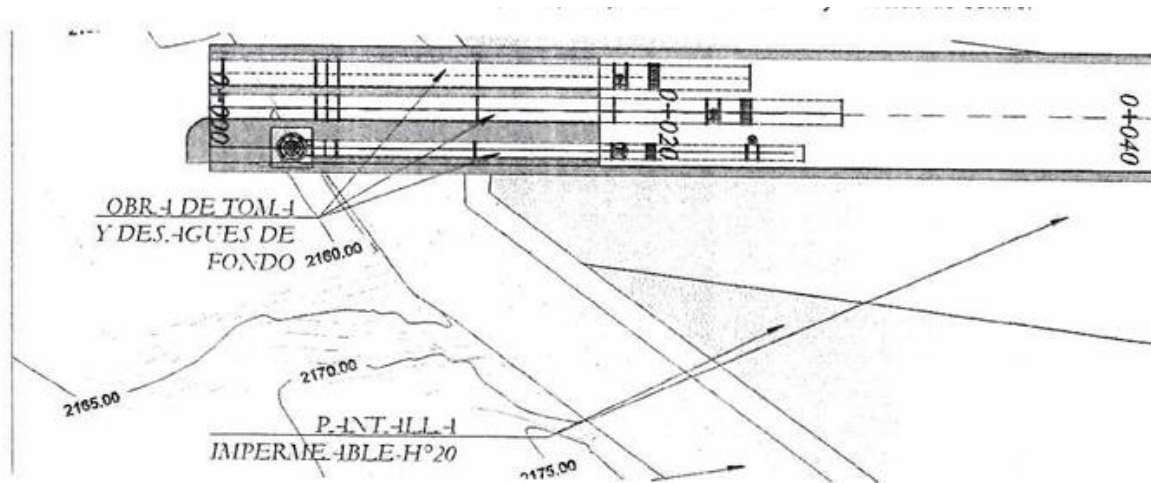
La galería fue construida para atravesar el cuerpo de presa, y proteger los sistemas de válvulas y tuberías para la descarga de fondo, permitiendo entregar los caudales producto de los diferentes desfogues de fondo programados o de emergencia a la quebrada Rumichaca, disipando su energía al encontrar secciones lo suficientemente amplias para este efecto, y para el sistema de riego, se constituye como el primer tramo de conducción y control de entrega de caudales para fines agrícolas. La galería tiene un ancho interior de 4,90 m y una altura de 2,90 m, además tiene una longitud de 170 m.

Figura 3.4. Emplazamiento en la Galería sistemas desfogue de fondo y riego.



Fuente: SEDEGIA.

Figura 3.5. Vista en planta de la obra de toma para riego (torre), disposición de tuberías y válvulas de control.



Fuente: Criterios para la operación del desfogue de fondo. “Empresas Asociadas Tarija”

Características de las tuberías:

- Sistema de riego: 1 tubo, D=600 mm – Lado izquierdo
- Sistema de descarga de fondo: 2 tubos, D=1000 mm

3.1.3. Descripción de las áreas de aporte.

Para la construcción de la presa Sella-Rumicancha, se estudió 5 subcuencas:

- **Jarcas:** Corresponde el área de aporte propio del embalse “Jarcas”. Tiene importancia sobre el embalse Sella-Rumicancha” ya que aporta por dos meses al embalse a través de un sistema de aducción (a través tubería y cauce natural).
- **Rumicancha:** Es la cuenca propia de aporte del embalse “Sella – Rumicancha”.
- **San Pedrito:** Es la cuenca propia de aporte del embalse “San Pedrito”. Esta subcuenca se encuentra dentro de la cuenca Rumicancha.
- **Negro muerto:** Cuenca de aporte directa para trasvase.
- **Chaupicancha:** Cuenca de aporte directa para trasvase.

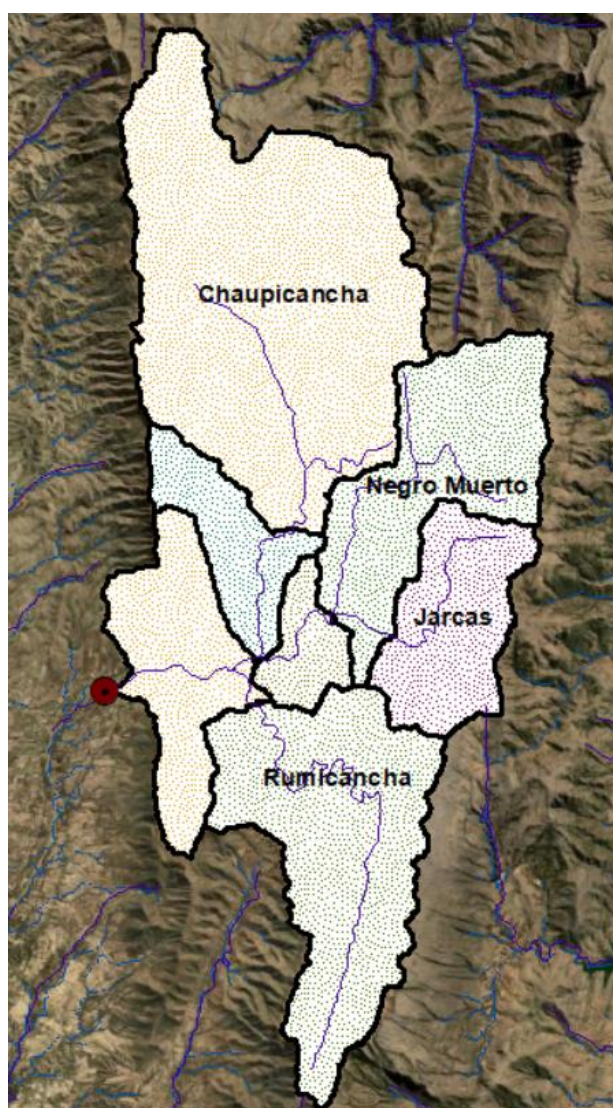
Cabe resaltar que los embalses de “San Pedrito” y “Jarcas no están construidos.

Tabla 3.5. Algunos parámetros de las subcuencas de estudio contemplados en el TESA.

	JARCAS	RUMI-CANCHA	SAN PEDRITO	NEGRO MUERTO	CHAUPI-CANCHA
A = Área de la cuenca (km²)	13,95	28,94	7,04	25,25	60,18
Punto más alto (m.s.n.m)	2598,03	2500,00	2500,00	2800,00	3023,70
Punto más bajo (m.s.n.m)	2436,50	2200,00	2400,00	2234,50	2249,60
H = Desnivel entre pto. más alto y pto. más bajo del río principal (m)	161,53	300,00	100,00	565,50	774,10
L = Longitud del río principal de la cuenca (km)	4,15	12,74	4,58	8,68	14,40
J = Pendiente del río principal de la cuenca (%)	0,04	0,02	0,02	0,07	0,05

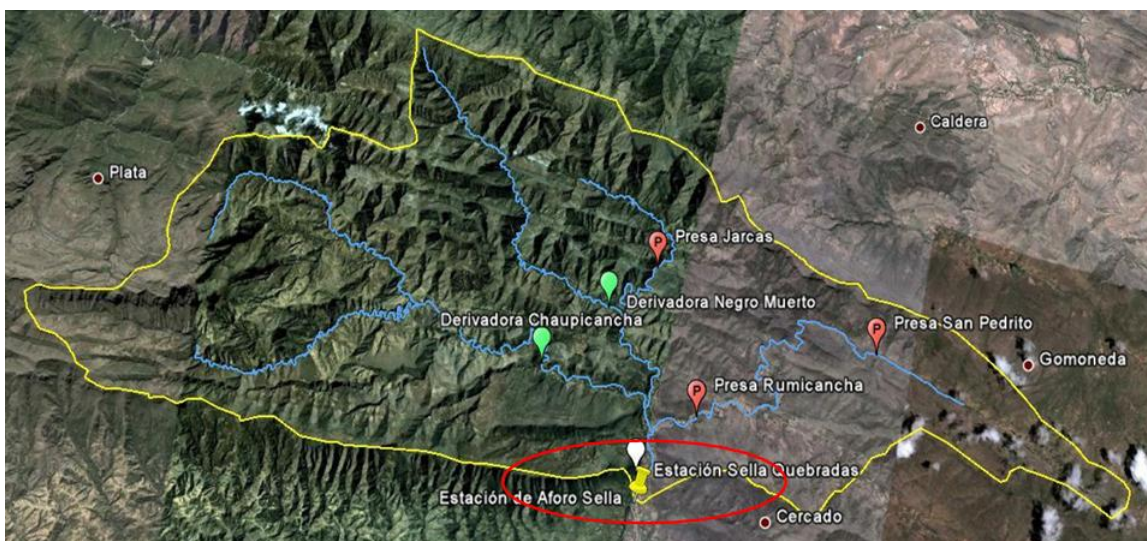
Fuente: ESTUDIO TESA: “CONSTRUCCIÓN PRESA SELLA – RUMICANCHA”.

Figura 3.6. Esquema de subcuencas contempladas en el estudio TESA.



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 3.7. Área de Estudio y ubicación de las obras y la estación hidrométrica.



Fuente: ESTUDIO TESA: “CONSTRUCCIÓN PRESA SELLA – RUMICANCHA”.

3.1.4. Descripción de los canales de trasvase propuestos y sistema de aducción.

TRASVASE CHAUPICANCHA - RUMICANCHA.

El canal trasvase consiste en la construcción de hormigón ciclópeo un canal rectangular con las siguientes dimensiones, 1,50 m de base, 0,75 m de alto interior y 0,20 m de espesor con una longitud total de 6.609,97 m. desde Chaupicancha hasta el cruce de los dos canales de trasvase, pasando el mismo cambia de sección por 1,50 m x 1,00 m. hasta llegar al embalse de Rumicancha.

Cabe indicar también que este canal de trasvase beneficiara a la comunidad de Sella Quebradas en su recorrido de Chaupicancha a Rumicancha por lo cual en el diseño se tiene previsto la construcción de cámaras en lugares estratégicos.

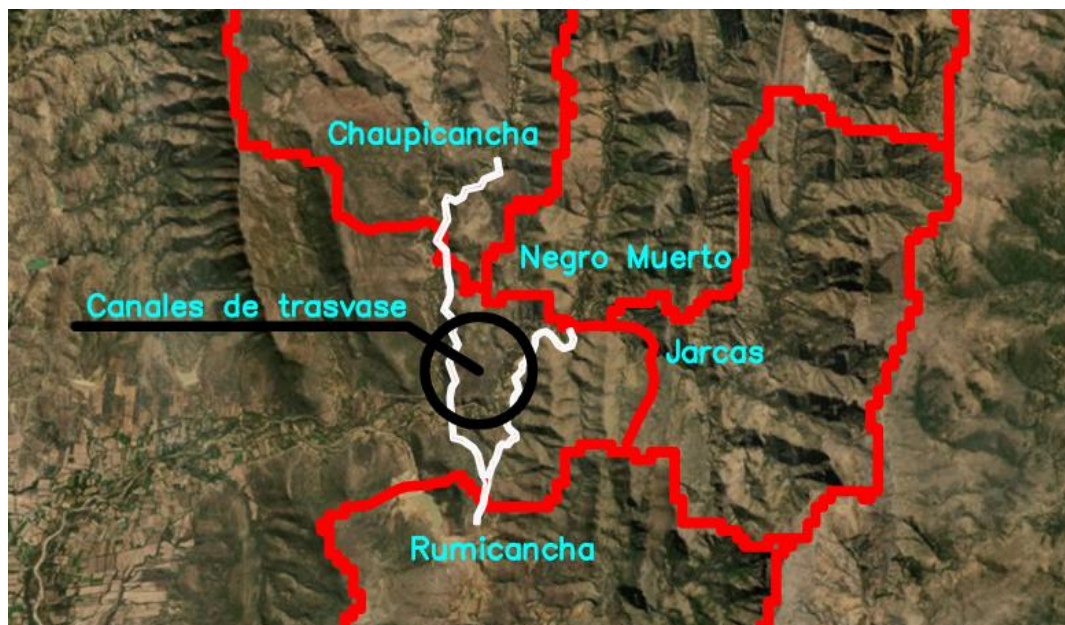
TRASVASE NEGRO MUERTO - RUMICANCHA.

El canal trasvase es de hormigón ciclópeo, sección rectangular con las siguientes dimensiones, 1,00 m de base, 0,65 m de alto interior y 0,20 m de espesor con una longitud total de 4.149,11m. desde el sector denominado Negro muerto que se encuentra en la comunidad de Sella Candelaria hasta el cruce o intersección de los dos canales de Trasvase.

Cabe indicar también que este canal de trasvase beneficiara a la comunidad de Sella Candelaria y Sella Quebradas en su recorrido del sector denominado Negro Muerto a

Rumicancha por lo cual en el diseño se tiene previsto la construcción de cámaras en lugares estratégicos.

Figura 3.8. Esquema de canales de trasvase.



Fuente: Elaboración propia.

SISTEMA DE ADUCCIÓN JARCAS – RUMICANCHA.

Después de salir de la caseta de válvulas, mediante tubería se lleva el caudal regulado hacia una quebrada que desemboca en el embalse Rumicancha. El sistema presenta una longitud de 2727,9 m. con una tubería de PVC SDR21 de Diámetro 12”.

En el recorrido de la tubería se colocaron hidrantes para poder beneficiar con riego a la comunidad de Sella Candelaria en especial a las parcelas cercanas al sistema de Aducción Jarcas – Rumicancha.

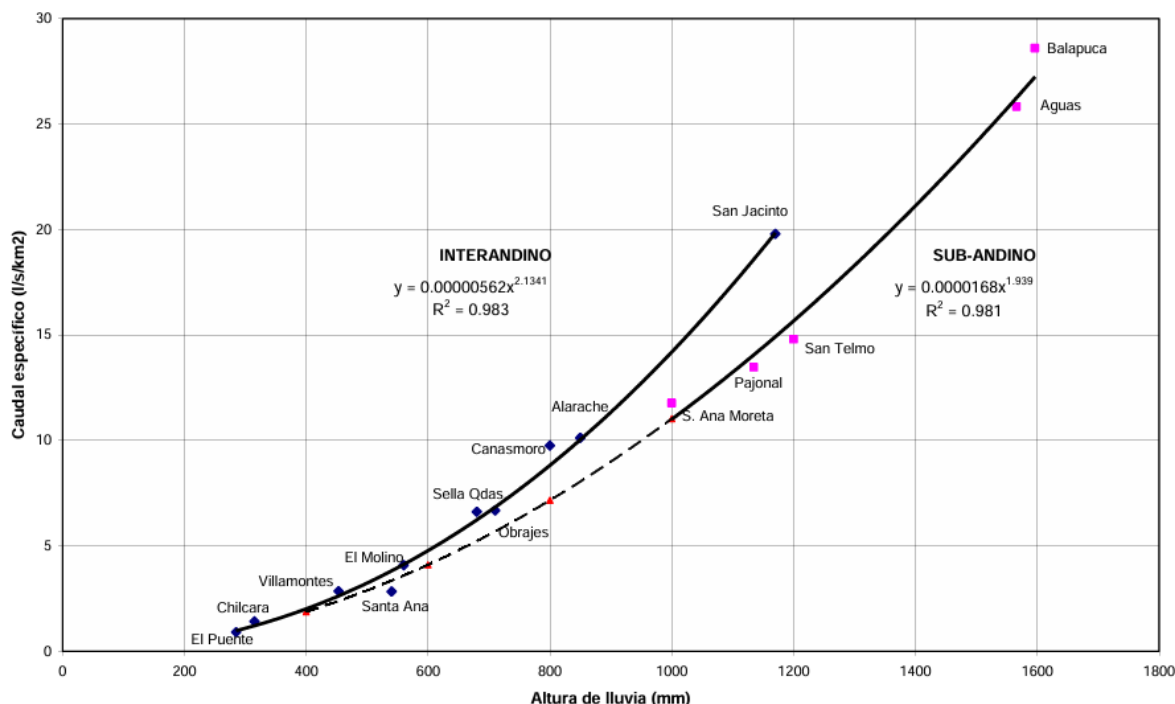
3.1.5. Caudales medios mensuales.

Para el cálculo de caudales medios mensuales, el estudio TESA usó un método que se basa en la correlación de la precipitación media de la cuenca y los caudales específicos medios.

Los caudales específicos obtenidos en cada una de las estaciones se correlacionaron con las lluvias medias en sus respectivas cuencas. Dicha correlación permitió obtener dos leyes de regresión para las estaciones consideradas, una correspondiente a las cuencas que se

encuentran en la región interandina y la otra a las cuencas del subandino, cuyos resultados se muestran en el gráfico siguiente:

Figura 3.9. Caudales específicos: Medios anuales vs. Precipitación media (28/10/2008)



Fuente: ESTUDIO TESA: “CONSTRUCCIÓN PRESA SELLA – RUMICANCHA”.

La correlación obtenida para los ríos cuya cuenca se encuentra en la región interandina, o sea en el valle central y en general en la parte alta, es buena, si se consideran las 10 estaciones cuyos datos son:

Tabla 3.6. Caudales medios mensuales cuencas de referencias.

Estación	Caudal específico [l/s/km²]	Pm en la Cuenca [mm]
El Puente	0,90	285
El Molino	4,08	560
Chilcara	1,41	315
Villamontes	2,85	453
Canasmoro	9,70	800
Sella Quebradas	6,61	680
Obrajés	6,67	710
Santa Ana	2,83	540
San Jacinto	19,79	1170
Alarache	10,12	850

Fuente: ESTUDIO TESA: “CONSTRUCCIÓN PRESA SELLA – RUMICANCHA”.

La estación hidrométrica de Sella Quebradas estudia el cauce principal del cual es contribuyente al Quebrada Jarcas, la quebrada Negro Muerto, y la Quebrada Chaupicanha.

El estudio TESA uso la estación Sella Quebradas, para la generación de caudales medios a partir de precipitaciones utilizó de base el estudio “Recursos hídricos superficiales y sus posibilidades de aprovechamiento en el Departamento de Tarija” elaborado por el Ing. Alfonso Vacaflares en el año 2008.

El procedimiento usado consiste básicamente en obtener el caudal específico y los coeficientes de distribución para la cuenca estudiada a base de la estación hidrométrica Sella Quebradas, con estos datos se estimó el caudal medio para cada subcuenca de interés que engloba la cuenca de Sella Quebradas en general. Revisando la información del estudio TESA y de la referencia mencionada, se pudo observar que básicamente los caudales específicos y coeficientes de distribución fueron extraídos del estudio ya elaborado por el Ing. Alfonso Vacaflares en el año 2008. Pero en este proceso se pudo observar ciertos “errores” entre otras observaciones que se detallaran a continuación.

3.1.5.1. Análisis de aforos y coeficientes de distribución.

El estudio TESA recopila dos fuentes de información de aforo de caudales, una de ellas es un registro de 347 aforos realizados entre los años 1978-2006. En el informe hidrológico se muestra la información de aforos y coeficientes de distribución (ver tabla 3.7).

El aporte anual es de 16 573 248,00 m³. Sin embargo, esta información no fue usada para estimar los caudales medios de las subcuencas de estudio. A parte, se puede detectar un error en el caudal específico, el cual no es 6,61 l/skm²; en el siguiente cálculo se muestra el caudal específico con estos caudales medios:

$$q \text{ específico} = \frac{0,53 \text{ m}^3/\text{s}}{143 \text{ km}} \times 1000 = 3,70 \text{ l/s km}^2$$

Respecto al caudal específico de 6,61 l/skm², se observa una reducción del 55%.

Tabla 3.7. Caudales medios mensuales y coeficientes de distribución.

ESTACIÓN:	Sella Qdas	Coeficientes
Río:	Sella	Distribución
Cuenca [km ²]	143	
Modulo [m³/s]	0,530	
Q octubre [m ³ /s]	0,008	0,015
Q noviembre [m ³ /s]	0,270	0,510
Q diciembre [m ³ /s]	0,770	1,454
Q enero [m ³ /s]	1,571	2,966
Q febrero [m ³ /s]	1,430	2,700
Q marzo [m ³ /s]	1,506	2,843
Q abril [m ³ /s]	0,611	1,154
Q mayo [m ³ /s]	0,122	0,230
Q junio [m ³ /s]	0,042	0,079
Q julio [m ³ /s]	0,017	0,032
Q agosto [m ³ /s]	0,006	0,011
Q septiembre [m ³ /s]	0,003	0,006
q específico [l/skm²]	6,610	
Q anual máx. [m ³ /s]	2,06	
Q anual mín. [m ³ /s]	0,23	

Fuente: ESTUDIO TESA: “CONSTRUCCIÓN PRESA SELLA – RUMICANCHA”.

La otra fuente de datos que en realidad se utilizó para realizar los cálculos de caudales medios mensuales (este detalle no fue mencionado por el informe hidrológico, sin embargo hace mención en una planilla de cálculo Excel), menciona que fue extraída del estudio “Recursos hídricos superficiales y sus posibilidades de aprovechamiento en el Departamento de Tarija” elaborado por el Ing. Alfonso Vacaflores en el año 2008, donde analiza 11 años de registro de datos para estación hidrométrica Sella Quebradas entre el periodo 1980-1997. A continuación, se detallan los caudales medios mensuales y coeficientes de distribución en el estudio mencionado:

Tabla 3.8. Caudales medios mensuales y coeficientes de distribución elaborados por el Ing. Alfonso Vacaflores.

ESTACIÓN:	Sella Qdas	Coeficientes Distribución
Río:	Sella	
Cuenca [km ²]	143,00	
Modulo [m³/s]	0,95	
Q octubre [m ³ /s]	0,01	0,01
Q noviembre [m ³ /s]	0,33	0,35
Q diciembre [m ³ /s]	1,32	1,39
Q enero [m ³ /s]	2,34	2,46
Q febrero [m ³ /s]	2,61	2,75
Q marzo [m ³ /s]	3,63	3,82
Q abril [m ³ /s]	0,89	0,94
Q mayo [m ³ /s]	0,12	0,18
Q junio [m ³ /s]	0,04	0,04
Q julio [m ³ /s]	0,02	0,03
Q agosto [m ³ /s]	0,02	0,02
Q septiembre [m ³ /s]	0,01	0,01
q específico [l/skm²]	6,61	
Aporte [Hm³]	29,96	

Fuente: Recursos hídricos superficiales y sus posibilidades de aprovechamiento en el Departamento de Tarija. Vacaflores, Alfonso.

Los coeficientes de distribución de la tabla 3.8., en realidad (mal asumidos) son los caudales medios mensuales presentados en el estudio del Ing. Alfonso Vacaflores (tabla 3.7.).

Se observa que los coeficientes de distribución asumidos por el estudio TESA, no varían mucho en relación a los verdaderos valores, lo cual no supone un cambio significativo en la estimación de los aportes mensuales calculados por el estudio TESA, pero esta situación puede dar a entender que no se tomó especial atención al momento de estimar los aportes mensuales.

Los coeficientes de distribución usados por el estudio TESA son los siguientes:

Tabla 3.9. Coeficientes de distribución usados por el estudio TESA para estimar los caudales medios mensuales.

ESTACIÓN:	Sella Qdas
Río:	Sella
Cuenca [km ²]	143
Modulo [m ³ /s]	0,95
Q octubre [m ³ /s]	0,01
Q noviembre [m ³ /s]	0,33
Q diciembre [m ³ /s]	1,32
Q enero [m ³ /s]	2,34
Q febrero [m ³ /s]	2,61
Q marzo [m ³ /s]	3,63
Q abril [m ³ /s]	0,89
Q mayo [m ³ /s]	0,12
Q junio [m ³ /s]	0,04
Q julio [m ³ /s]	0,02
Q agosto [m ³ /s]	0,02
Q septiembre [m ³ /s]	0,01
q específico [l/skm²]	6,61

Fuente: ESTUDIO TESA: “CONSTRUCCIÓN PRESA SELLA – RUMICANCHA”.

3.1.5.2. Ecurrimientos mensuales estimados por el estudio TESA.

Para este cálculo se usó el caudal específico de 6,61 l/s km² y los coeficientes de distribución mal asumidos de la tabla 3.9.

La metodología usada se basa en multiplicar el caudal específico por las áreas de cada una de las subcuencas estudiadas para obtener un caudal medio anual y posteriormente utilizando los coeficientes de distribución se generó los caudales medios mensuales para cada una de las cuencas.

Tabla 3.10. Caudales medios anuales de las cuencas de estudio.

DESCRIPCIÓN	ÁREA CUENCA [km²]	Caudal Específico [l/s*km²]	Caudal Anual [l/s]
Obra de Toma Chaupicanha	60,18	6,610	397,79
Obra de Toma Negro Muerto	25,25	6,610	166,90
Presas Rumicanha	28,94	6,610	191,29
Presas San Pedrito	7,04	6,610	46,53
Presas Jarcas	13,95	6,610	92,21

Fuente: ESTUDIO TESA: “CONSTRUCCIÓN PRESA SELLA – RUMICANCHA”.

Tabla 3.11. Caudales medios obra de toma Chaupicancha.

Mes	Coef. Distrib.	Caudal medio [l/s]	Aporte medio [m³]	Aporte medio [mm]	Q trasvase [l/s]	Volumen trasvase [m³]
Octubre	0,01	3,98	10 654,40	0,18		
Noviembre	0,33	131,27	340 253,48	5,65		
Diciembre	1,32	525,08	1 406 381,06	23,37	450,00	1 205 280,00
Enero	2,34	930,83	2 493 130,07	41,43	450,00	1 205 280,00
Febrero	2,61	1 038,23	2 511 689,35	41,74	450,00	1 088 640,00
Marzo	3,63	1 443,98	3 867 547,93	64,27	450,00	1 205 280,00
Abril	0,89	354,03	917 653,33	15,25		
Mayo	0,12	47,73	127 852,82	2,12		
Junio	0,04	15,91	41 242,85	0,69		
Julio	0,02	7,96	21 308,80	0,35		
Agosto	0,02	7,96	21 308,80	0,35		
Septiembre	0,01	3,98	10 310,71	0,17		
Suma	11,34	4 510,94	11 769 333,62	195,57	1 800,00	4 704 480,00
Promedio		375,91	980 777,80	16,30		

Fuente: ESTUDIO TESA: “CONSTRUCCIÓN PRESA SELLA – RUMICANCHA”.

Tabla 3.12. Caudales medios obra de toma Negro Muerto.

Mes	Coef. Distrib.	Caudal medio [l/s]	Aporte medio [m³]	Aporte medio [mm]	Q trasvase [l/s]	Volumen trasvase [m³]
Octubre	0,01	1,67	4 470,32	0,18		
Noviembre	0,33	55,08	142 761,72	5,65		
Diciembre	1,32	220,31	590 081,79	23,37		
Enero	2,34	390,55	1 046 054,08	41,43	350,00	937 440,00
Febrero	2,61	435,62	1 053 841,08	41,74	350,00	846 720,00
Marzo	3,63	605,86	1 622 724,91	64,27	350,00	937 440,00
Abril	0,89	148,54	385 024,04	15,25		
Mayo	0,12	20,03	53 643,80	2,12		
Junio	0,04	6,68	17 304,45	0,69		
Julio	0,02	3,34	8 940,63	0,35		
Agosto	0,02	3,34	8 940,63	0,35		
Septiembre	0,01	1,67	4 326,11	0,17		
Suma	11,34	1 892,67	4 938 113,56	195,57	1 050,00	2 721 600,00
Promedio		157,72	411 509,46	16,30		

Fuente: ESTUDIO TESA: “CONSTRUCCIÓN PRESA SELLA – RUMICANCHA”.

Tabla 3.13. Caudales medios presa Rumicancha.

Mes	Coef. Distrib.	Caudal medio [l/s]	Aporte medio [m³]	Aporte medio [mm]
Octubre	0,01	1,91	5 123,60	0,18
Noviembre	0,33	63,13	163 624,72	5,65
Diciembre	1,32	252,51	676 315,52	23,37
Enero	2,34	447,63	1 198 922,97	41,43
Febrero	2,61	499,28	1 207 847,95	41,74
Marzo	3,63	694,40	1 859 867,68	64,27
Abril	0,89	170,25	441 290,92	15,25
Mayo	0,12	22,96	61 483,23	2,12
Junio	0,04	7,65	19 833,30	0,69
Julio	0,02	3,83	10 247,20	0,35
Agosto	0,02	3,83	10 247,20	0,35
Septiembre	0,01	1,91	4 958,32	0,17
Suma	11,34	2 169,27	5 659 762,63	195,57
Promedio		180,77	471 646,89	16,30

Fuente: ESTUDIO TESA: “CONSTRUCCIÓN PRESA SELLA – RUMICANCHA”.

Tabla 3.14. Caudales medios presa San Pedrito.

Mes	Coef. Distrib.	Caudal medio [l/s]	Aporte medio [m³]	Aporte medio [mm]
Octubre	0,01	0,47	1 246,38	0,18
Noviembre	0,33	15,36	39 803,66	5,65
Diciembre	1,32	61,43	164 521,81	23,37
Enero	2,34	108,89	291 652,30	41,43
Febrero	2,61	121,45	293 823,41	41,74
Marzo	3,63	168,92	452 434,99	64,27
Abril	0,89	41,42	107 349,28	15,25
Mayo	0,12	5,58	14 956,53	2,12
Junio	0,04	1,86	4 824,69	0,69
Julio	0,02	0,93	2 492,75	0,35
Agosto	0,02	0,93	2 492,75	0,35
Septiembre	0,01	0,47	1 206,17	0,17
Suma	11,34	527,70	1 376 804,73	195,57
Promedio		43,98	114 733,73	16,30

Fuente: ESTUDIO TESA: “CONSTRUCCIÓN PRESA SELLA – RUMICANCHA”.

Tabla 3.15. Caudales medios presa Jarcas.

Mes	Coef. Distrib.	Caudal medio [l/s]	Aporte medio [m³]	Aporte medio [mm]
Octubre	0,01	0,92	2 469,74	0,18
Noviembre	0,33	30,43	78 872,32	5,65
Diciembre	1,32	121,72	326 005,58	23,37
Enero	2,34	215,77	577 918,98	41,43
Febrero	2,61	240,67	582 221,11	41,74
Marzo	3,63	334,72	896 515,35	64,27
Abril	0,89	82,07	212 716,25	15,25
Mayo	0,12	11,07	29 636,87	2,12
Junio	0,04	3,69	9 560,28	0,69
Julio	0,02	1,84	4 939,48	0,35
Agosto	0,02	1,84	4 939,48	0,35
Septiembre	0,01	0,47	1 206,17	0,09
Suma	11,34	1 045,20	2 727 001,61	195,48
Promedio		87,10	227 250,13	16,29

Fuente: ESTUDIO TESA: “CONSTRUCCIÓN PRESA SELLA – RUMICANCHA”.

3.2. Recopilación de información meteorológica.

3.2.1. Datos climatológicos (SENHAMI)

Para el presente proyecto de investigación, se utilizó los siguientes datos climáticos de la estación Sella Quebradas para la estimación de la evaporación y la comprobación de algunos parámetros usados con relación al modelo WEAP “Guadalquivir_3”:

- Temperatura máxima media.
- Temperatura mínima media.
- Temperatura media (media de temperatura máxima media y temperatura mínima media).
- Humedad relativa.
- Evaporación media.
- Precipitación.
- Velocidad máxima media.
- Velocidad mínima media.
- Velocidad media (media de velocidad máxima media y velocidad mínima media).

Tabla 3.16. Datos climáticos, estación Sella Quebradas (1980 – 2023)

Indice	Unidad	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	ANUAL
Precipitación	mm	145,1	122,6	92,5	25,6	4,4	0,8	1,5	3,6	10,6	28,5	59,6	122,1	616,9
Temp. Max. Media	°C	25,9	25,1	24,9	25,2	24,2	24,5	24,1	26,0	26,7	27,3	26,6	26,4	25,6
Temp. Min. Media	°C	13,3	12,9	12,2	10,3	6,2	4,0	3,5	5,2	7,7	10,9	12,2	13,2	9,3
Temp. Media	°C	19,6	19,0	18,6	17,8	15,2	14,2	13,8	15,6	17,2	19,1	19,4	19,8	17,4
Humed. Relativa	%	62,7	65,6	67,3	66,8	59,5	49,8	44,1	43,9	45,0	51,6	55,5	60,4	56
Evapo. Media	mm/día	5,38	4,97	4,50	4,04	3,49	3,29	3,43	4,24	5,04	5,59	5,60	5,60	4,60
V. max. media viento	km/hr	12,5	10,1	9,6	11,3	12,3	11,8	13,0	14,3	16,7	18,1	16,4	13,6	13,3
V. min. media viento	km/hr	1,2	1,3	1,4	1,5	1,9	1,8	1,8	1,9	2,1	2,4	1,9	1,4	1,7
V. media viento	km/hr	6,9	5,7	5,5	6,4	7,1	6,8	7,4	8,1	9,4	10,2	9,2	7,5	7,5

Fuente: SENHAMI.

3.2.2. Modelo hidrológico “Guadalquivir_3” modificado por PROCUENCA.

Para el presente proyecto se usó la información climática ya procesado por el modelo WEAP “Guadalquivir_3”, la cual a su vez se basa en la información del modelo “Guadalquivir_2” que usa información del periodo 1980-2018, esta información fue extendida hasta el año 2020.

La información meteorológica utilizada por el modelo “Guadalquivir_3” incluye:

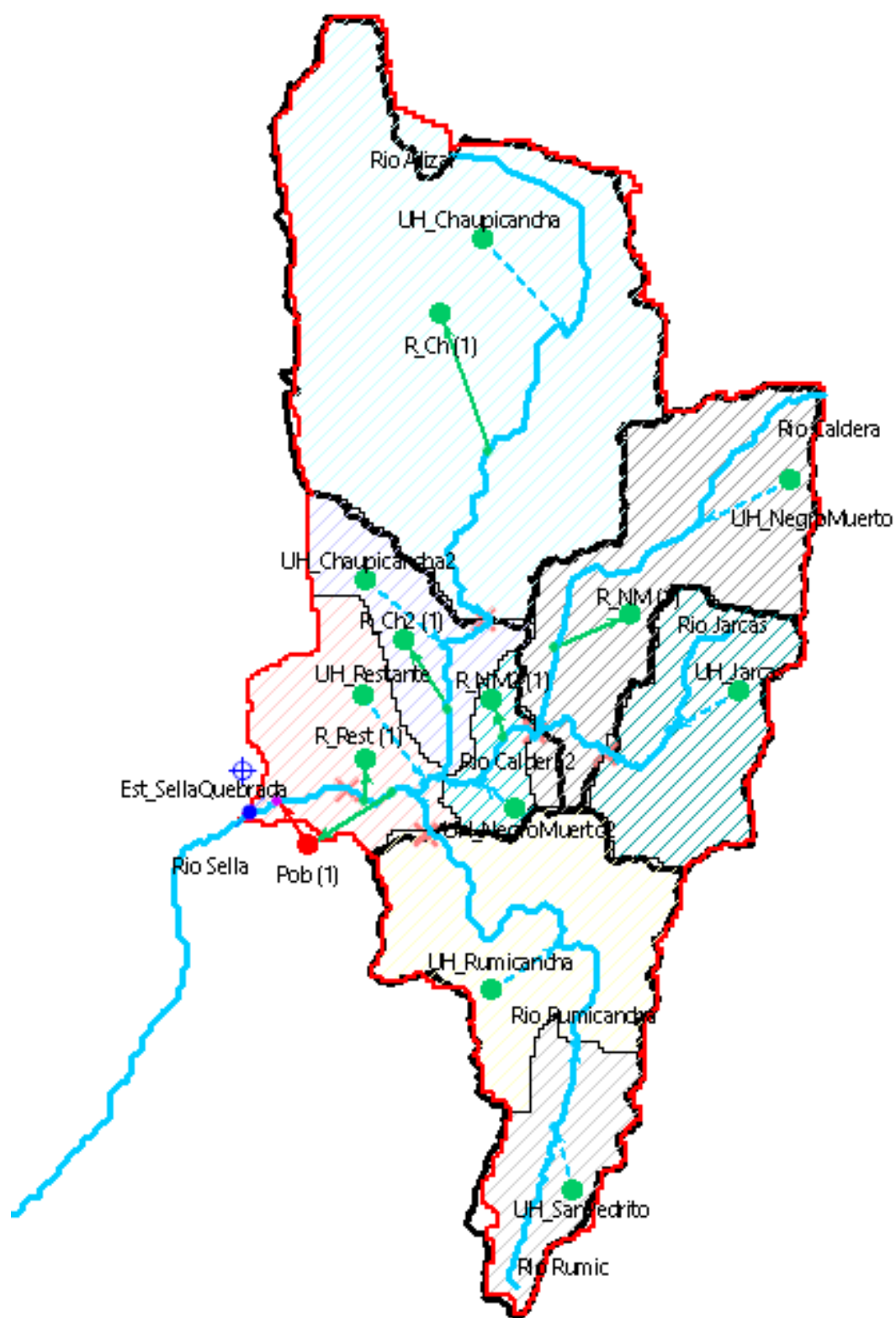
- Datos meteorológicos y de modelación hidrológica del estudio de riesgo climático "Evaluación de riesgo climático para identificar estrategias robustas de adaptación en el sector del agua en Bolivia".
- Información meteorológica, de modelación hidrológica e hidrométrica del estudio "Balance Hídrico Nacional 2023".

El modelo “Guadalquivir_3” está dividido en unidades hidrológicas de cada subcuenca que engloba la cuenca del Guadalquivir, las unidades hidrológicas que componen la zona de estudio (cuenca Sella Quebrada), está compuesta por las siguientes unidades hidrológicas: UH_4, UH_8589944, UH_Jarcas, UH_SanPedrito, UH_8589942 y UH_8589941.

[illegible]

Fuente: Modelo WEAP “Guadalquivir_3”.

Figura 3.11. Esquema modelo WEAP “SellaQuebrada_1”.



Fuente: Modelo WEAP “SellaQuebrada_1”.

Se procedió a extraer la información meteorológica del modelo “Guadalquivir_3” de las unidades hidrológicas correspondientes al estudio y se usó esta información en el modelo “SellaQuebrada_1”. En la siguiente tabla se muestra la relación de los datos usados en los dos modelos WEAP:

Tabla 3.17. Relación de datos entre los modelos “Guadalquivir_3” y “SellaQuebrada_1”.

Datos Usados	Guadalquivir_3	SellaQuebrada_1
• Evapotranspiración • Nubosidad • Precipitación • Temperatura	UH_4	UH_Chaupicancha UH_Chaupicancha2
	UH_8589944	UH_NegroMuerto UH_NegroMuerto2
	UH_Jarcas	UH_Jarcas
	UH_SanPedrito	UH_SanPedrito
	UH_8589942	UH_Rumicancha
	UH_8589941	UH_Restante

Fuente: Elaboración propia

La información extraída es la siguiente:

- Evapotranspiración de referencia.
- Nubosidad
- Precipitación.
- Temperatura.

Los datos de humedad relativa y velocidad del viento se toman de la estación Sella Quebrada por ser la más representativa. El modelo “Guadalquivir_3” toma estos datos de la estación Aeropuerto como también la nubosidad por tener información de este parámetro.

A continuación, se muestra un resumen de los datos meteorológicos para cada unidad hidrológica estudiada:

Tabla 3.18. Resumen climatológico: UH_Chaupicancha y UH_Chaupicancha2.

Indice	Unidad	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	ANUAL
ET. De referencia	mm	122,0	105,4	105,2	91,1	77,6	64,9	75,3	98,8	116,8	134,0	128,5	127,2	103,9
Humedad Relativa	%	62,7	65,6	67,3	66,8	59,5	49,8	44,1	43,9	45,0	51,6	55,5	60,4	56,0
Nubosidad	S.U.	0,4	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,5	0,5	0,4	0,6
Precipitación	mm	139,7	123,7	94,7	26,4	4,3	1,2	1,1	3,6	9,4	34,0	63,5	123,9	625,6
Temperatura media	°C	16,1	15,8	15,6	14,9	12,7	11,3	10,9	12,5	13,9	15,9	16,2	16,5	14,3
V. media viento	m/s	1,9	1,6	1,5	1,8	2,0	1,9	2,1	2,2	2,6	2,8	2,5	2,1	2,1

Fuente: Modelo WEAP “SellaQuebrada_1”

Tabla 3.19. Resumen climatológico: UH_NegroMuerto y UH_NegroMuerto2

Indice	Unidad	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	ANUAL
ET. De referencia	mm	123,8	106,9	106,7	92,2	78,4	65,3	75,9	99,8	121,2	135,8	130,3	129,0	105,4
Humeda Relativa	%	62,7	65,6	67,3	66,8	59,5	49,8	44,1	43,9	45,0	51,6	55,5	60,4	56,0
Nubosidad	S.U.	0,4	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,5	0,5	0,4	0,6
Precipitacion	mm	139,0	120,4	91,5	26,1	4,3	1,1	1,0	3,8	9,3	34,3	62,4	119,1	612,3
Temperatura media	°C	16,6	16,3	16,0	15,3	13,0	11,6	11,2	12,8	14,3	16,3	16,6	17,0	14,7
V. media viento	m/s	1,9	1,6	1,5	1,8	2,0	1,9	2,1	2,2	2,6	2,8	2,5	2,1	2,1

Fuente: Modelo WEAP “SellaQuebrada_1”

Tabla 3.20. Resumen climatológico: UH_Jarcas

Indice	Unidad	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	ANUAL
ET. De referencia	mm													
Humeda Relativa	%	62,7	65,6	67,3	66,8	59,5	49,8	44,1	43,9	45,0	51,6	55,5	60,4	56,0
Nubosidad	S.U.	0,4	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,5	0,5	0,4	0,6
Precipitacion	mm	139,0	120,4	91,5	26,1	4,3	1,1	1,0	3,8	9,3	34,3	62,4	119,1	612,3
Temperatura media	°C	16,6	16,3	16,0	15,3	13,0	11,6	11,2	12,8	14,3	16,3	16,6	17,0	14,7
V. media viento	m/s	1,9	1,6	1,5	1,8	2,0	1,9	2,1	2,2	2,6	2,8	2,5	2,1	2,1

Fuente: Modelo WEAP “SellaQuebrada_1”

Tabla 3.21. Resumen climatológico: UH_SanPedrito

Indice	Unidad	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	ANUAL
ET. De referencia	mm													
Humeda Relativa	%	62,7	65,6	67,3	66,8	59,5	49,8	44,1	43,9	45,0	51,6	55,5	60,4	56,0
Nubosidad	S.U.	0,4	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,5	0,5	0,4	0,6
Precipitacion	mm	136,0	114,9	85,5	23,2	3,9	1,1	0,8	3,1	8,6	33,8	60,8	114,3	586,0
Temperatura media	°C	17,8	17,4	17,1	16,2	13,7	12,2	11,8	13,5	15,1	17,3	17,7	18,1	15,7
V. media viento	m/s	1,9	1,6	1,5	1,8	2,0	1,9	2,1	2,2	2,6	2,8	2,5	2,1	2,1

Fuente: Modelo WEAP “SellaQuebrada_1”

Tabla 3.22. Resumen climatológico: UH_Rumicancha

Indice	Unidad	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	ANUAL
ET. De referencia	mm	127,9	110,3	110,0	94,8	80,2	66,5	77,3	102,2	124,5	139,8	131,1	133,1	108,1
Humeda Relativa	%	62,7	65,6	67,3	66,8	59,5	49,8	44,1	43,9	45,0	51,6	55,5	60,4	56,0
Nubosidad	S.U.	0,4	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,5	0,5	0,4	0,6
Precipitacion	mm	136,0	114,8	85,9	22,7	3,8	0,9	0,8	3,2	8,6	33,5	60,8	113,4	584,3
Temperatura media	°C	17,7	17,4	17,1	16,2	13,7	12,2	11,8	13,5	15,1	17,2	17,6	18,1	15,6
V. media viento	m/s	1,9	1,6	1,5	1,8	2,0	1,9	2,1	2,2	2,6	2,8	2,5	2,1	2,1

Fuente: Modelo WEAP “SellaQuebrada_1”

Tabla 3.23. Resumen climatológico: UH_Restante

Indice	Unidad	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	ANUAL
ET. De referencia	mm	131,9	113,6	113,4	97,4	82,1	67,8	78,9	104,7	124,6	143,8	138,3	137,0	111,1
Humeda Relativa	%	62,7	65,6	67,3	66,8	59,5	49,8	44,1	43,9	45,0	51,6	55,5	60,4	56,0
Nubosidad	S.U.	0,4	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,5	0,5	0,4	0,6
Precipitacion	mm	139,8	119,7	90,1	24,4	4,0	1,1	1,0	3,4	9,7	33,4	63,8	123,4	613,6
Temperatura media	°C	18,8	18,4	18,1	17,0	14,4	12,7	12,3	14,2	15,9	18,1	18,6	19,1	16,5
V. media viento	m/s	1,9	1,6	1,5	1,8	2,0	1,9	2,1	2,2	2,6	2,8	2,5	2,1	2,1

Fuente: Modelo WEAP “SellaQuebrada_1”.

3.3. Información hidrométrica.

Para la validación y construcción del modelo “SellaQuebrada_1”, se utilizó información de aforos de diversas fuentes. Las fuentes usadas son:

- “Recursos hídricos superficiales y sus posibilidades de aprovechamiento en el Departamento de Tarija” elaborado por el Ing. Alfonso Vacaflares en el año 2008.
- Modelo WEAP “Guadalquivir_3” elaborado por Sergio Villa Gomez Gironda
- Estudio TESA: “CONSTRUCCIÓN PRESA SELLA – RUMICANCHA”.

3.4. Uso de suelo y cobertura vegetal.

3.4.1. Clasificación de uso de suelo y cobertura vegetal en WEAP

El modelo hidrológico “Guadalquivir_2” incorporó un mapa de uso de suelo y cobertura vegetal recopilado por la Agencia Espacial Europea (ESA) desde la base de datos en línea de WEAP. Este mapa sigue una clasificación estandarizada que incluye nueve categorías: agrícola, agua, áreas inundables, bosque, matorrales, pasto, urbano, vegetación dispersa y nieve. Sin embargo, en dicho modelo se utilizaron solo ocho de las categorías mencionadas, omitiendo la de nieve. Pero para el modelo “SellaQuebrada_1”, donde la zona de estudio se encuentra la parte alta de la cuenca del Guadalquivir, se usó las categorías: agrícola, bosque, pasto y matorrales.

La cuestión principal fue determinar si este mapa representa adecuadamente la cuenca del Guadalquivir o si se requería actualizarlo con un enfoque en la caracterización de suelos y cobertura vegetal. Para abordar esta duda, el equipo de PROCUENCA realizó una revisión exhaustiva de la literatura, centrada en las necesidades del modelo WEAP, el mapa de suelos actualizado y el mapa de cobertura vegetal más reciente del Guadalquivir (VT, 2022; GAD Tarija, 2023). Además, se realizaron consultas con expertos.

El mapa de uso de suelo y cobertura vegetal de la ESA es un complemento muy útil para la representación del comportamiento físico de la superficie y subsuelo de la cuenca en el modelo WEAP. Si bien existen mapas más detallados en la región, como el mapa de cobertura vegetal de Tarija, estos no han sido diseñados específicamente para modelar la hidrología superficial, por lo que se recomienda llevar a cabo estudios complementarios para evaluar su uso en este contexto.

Se concluyó que el mapa de uso de suelo y cobertura vegetal de la ESA es la mejor alternativa para el estudio de la cuenca Sella Quebrada, dado que no existe un mapa de suelos suficientemente avanzado en la región. Además, se reconoció la necesidad de realizar un estudio específico de la zona que valide este mapa en términos hidrológicos. Por lo tanto, no se realizaron cambios en el mapa de uso de suelo y cobertura vegetal en el modelo.

3.4.2. Clasificación de uso de suelo según ZONISIG.

Esta clasificación será como base de apoyo al momento de tomar decisiones. Se la clasifíco en grupos hidrológicos de acuerdo a la siguiente clasificación:

- Grupo A: Arena profunda, suelos profundos depositados por el viento, limos agregados.
- Grupo B: Suelos poco profundos depositados por el viento, marga arenosa.
- Grupo C: Margas arcillosas, margas arenosas poco profundas, suelos con bajo contenido orgánico y suelos con altos contenidos de arcilla.
- Grupo D: Suelos que se expanden significativamente cuando se mojan, arcillas altamente plásticas y ciertos suelos salinos.

Figura 3.12. Grupo hidrológico en la cuenca de estudio Sella Quebrada.



Fuente: Elaboración propia.

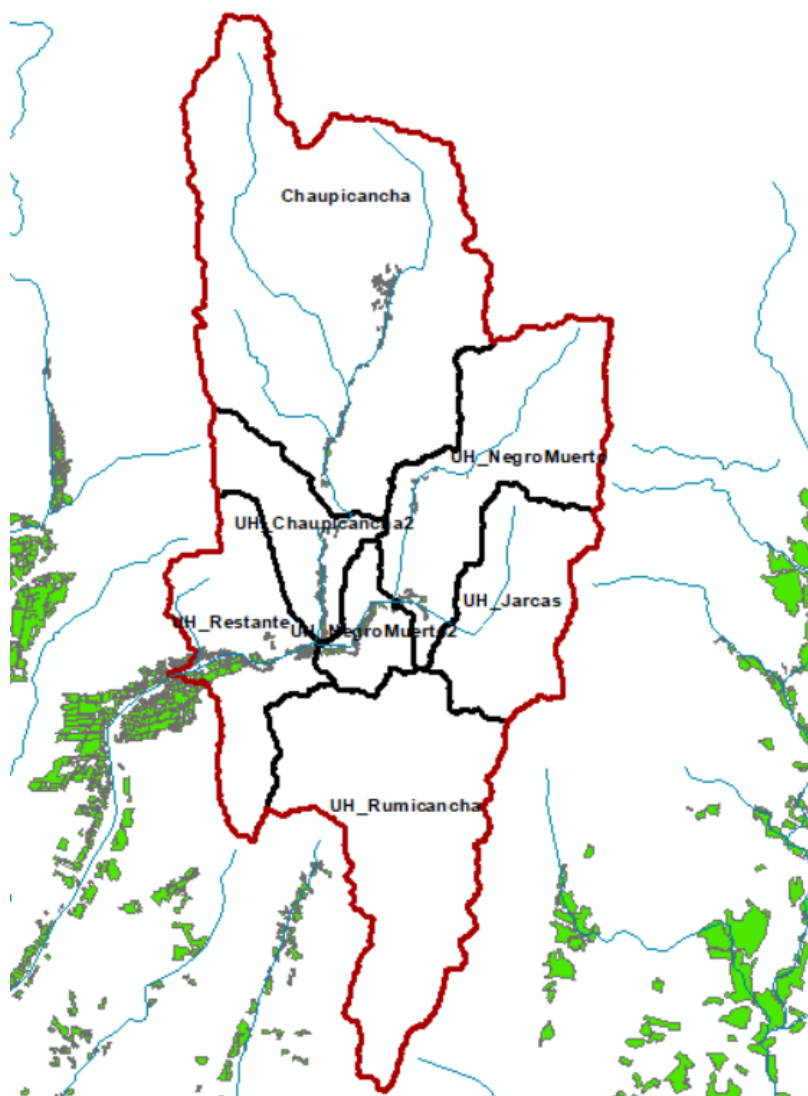
3.5. Información de demanda.

3.5.1. Demanda de agua para riego.

La información de las áreas de riego fue extraída del modelo “Guadalquivir_3”, el cual cuenta con un mapa (formato “Shp”) con las zonas de riego para toda la cuenca del Guadalquivir, este mapa fue superpuesto en la zona de estudio para determinar el área de riego de cada unidad hidrológica.

La información precisa con la que se cuenta es el porcentaje de área de cada cultivo para cada unidad hidrológica, a base de esto se determinó el área de cultivo.

Figura 3.13. Áreas de riego en la zona de estudio.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.24. Áreas de riego de las unidades hidrológicas del modelo “SellaQuebrada_1”.

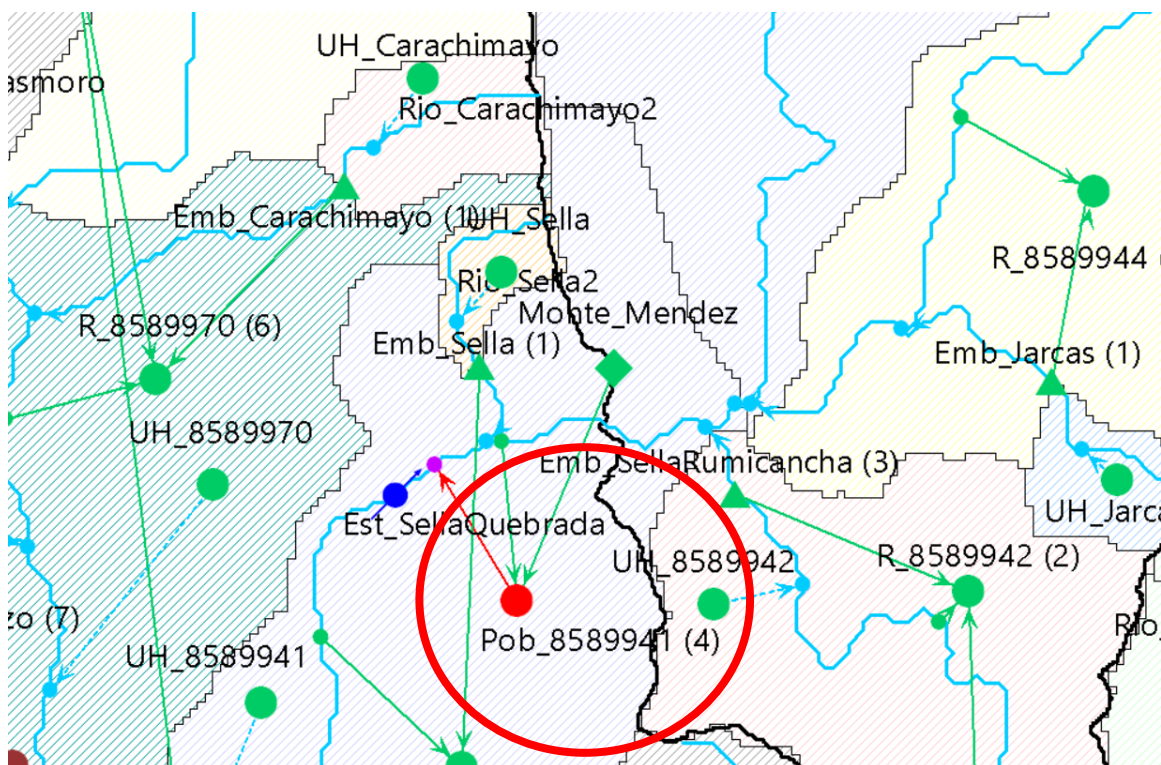
Unidad Hidrológica:	UH_Restante	UH_NegroMuerto2	UH_NegroMuerto	UH_Chaupicancha2	UH_Chaupicancha
Superficie	R_Rest	R_NM2	R_NM	R_Ch2	R_Ch
Total (has)	71,49	21,98	9,84	17,86	24,46
Maíz (has)	26,35	12,76	5,73	10,39	14,24
Papa (has)	10,41	5,22	2,34	4,25	5,82
Arveja (has)	1,69	2,27	1,02	1,86	2,54
Cebolla (has)	0,59	0,00	0,00	0,00	0,00
Hortalizas (has)	3,77	1,08	0,48	0,88	1,20
Avena (has)	6,43	0,01	0,00	0,00	0,00
Otros (has)	22,25	0,63	0,27	0,48	0,66

Fuente: Elaboración propia.

3.5.2. Demanda de agua potable.

El número de habitantes es de 1639, índice de crecimiento de 2,4% y un consumo de 100 l/hab/día.

Figura 3.14. Esquema de la población correspondiente a la comunidad Sella Quebrada del modelo “Guadalquivir_3”.



Fuente: Elaboración propia.

4. CAPÍTULO IV : INGENIERÍA DEL PROYECTO.

4.1. Esquematización, estructuración e incorporación de información al modelo WEAP “SellaQuebrada_1”.

4.1.1. Delimitación de la zona de estudio.

El modelo WEAP elaborado para la presente investigación “SellaQuebrada_1”, se dividió en unidades hidrológicas de acuerdo a los puntos de interés. El proyecto de la presa “Sella – Rumicancha” contempla la construcción de dos canales de trasvase que aportaran al embalse, ubicadas en las cuencas de Chaupicancha y Negro Muerto, también está previsto un aporte indirecto por tubería desde la presa Jarcas, la cual su construcción está previsto en una fase 2. De acuerdo a estas consideraciones se realizó la división en subcuencas, con ayuda a un mapa de ríos descargado de GEOBOLIVIA.

Las coordenadas de las obras de toma de Chaupicancha y Negro Muerto fueron extraídas del estudio TESA por aproximación según esquemas generales del proyecto, así mismo se procedió con los embalses de “Sella – Rumicancha” y “Jarcas”, en la siguiente tabla se detalla los puntos de estudio:

Tabla 3.25. Coordenadas de los puntos de estudio usados para la división de unidades hidrológicas del modelo WEAP “SellaQuebrada_1”.

Descripción	Este	Norte
Cuenca Chaupicancha	328283,867	7637558,059
Cuenca Negro Muerto	329195,385	7635388,220
Cuenca Jarcas	330585,779	7634873,103
Cuenca Rumicancha	327200,649	7633247,812

Fuente: Elaboración propia.

Las demás unidades hidrológicas se dividieron superponiendo el mapa del modelo “Guadalquivir_3”.

unidad hidrológica estudiada detecta automáticamente la superficie y la cubierta vegetal que corresponde a cada subcuenca de análisis (ver figura 4.7).

WEAP ofrece los datos DEM disponibles en dos resoluciones espaciales: 500 metros (15 segundos de arco) y 90 metros (3 segundos de arco), en este caso se usó el ultimo mencionado. Los datos de cobertura terrestre de ESA-CCI-LC provienen del satélite Espectrómetro de Imágenes de Resolución Media (MERIS) y PROBA-V y una combinación de datos AVHRR y SPOT-VGT para crear una secuencia completa de clasificación de cobertura terrestre que cubre el período entre 1992 y 2015 (24 años) con una resolución espacial de 300 m. Con esta información se construye la delimitación automática de cada subcuenca, como también la identificación de los cauces de ríos.

4.1.2. Uso de suelo y cobertura vegetal usadas.

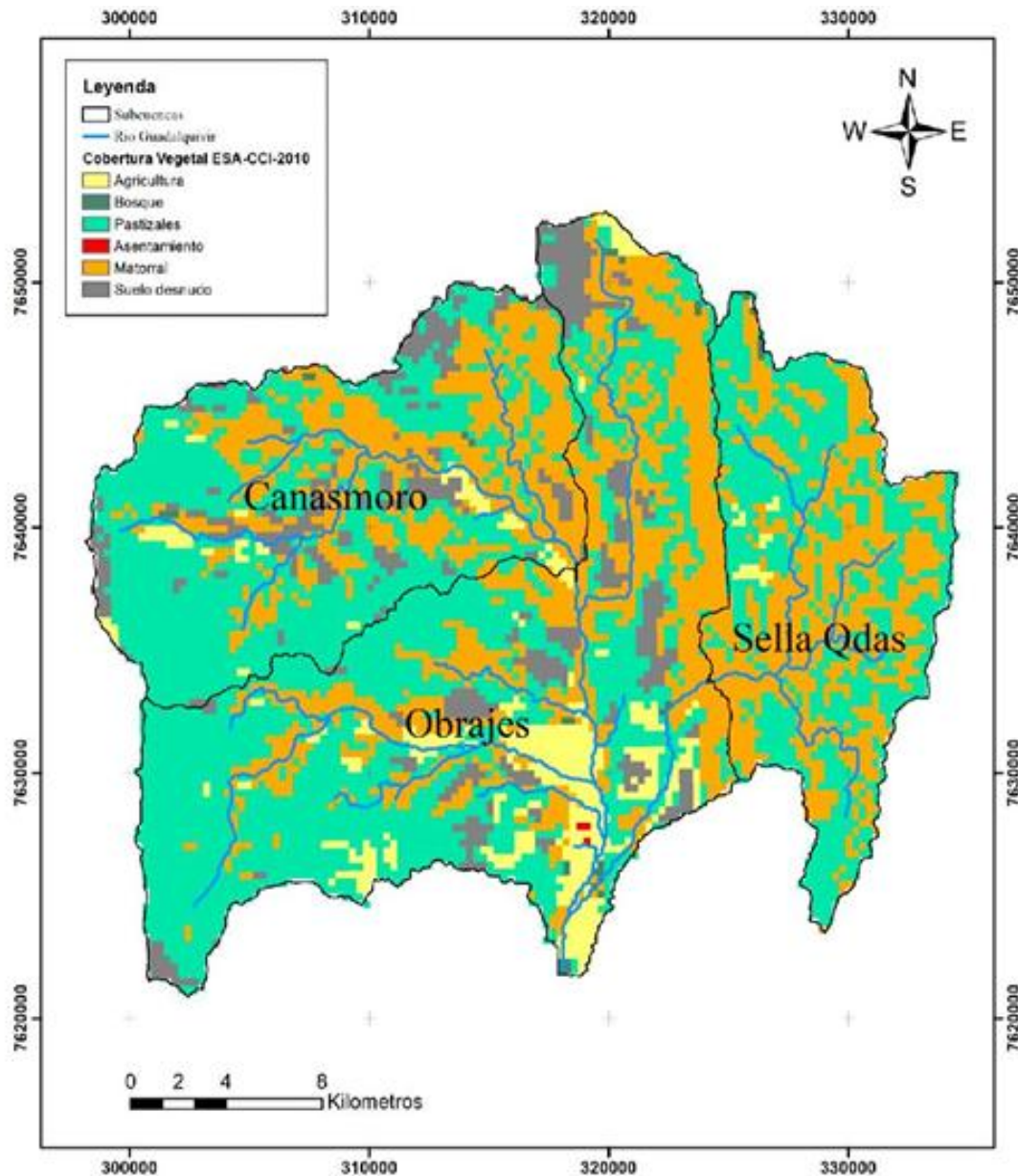
Como ya se mencionó en el capítulo 2, se hace uso del mapa de uso de suelo y cobertura vegetal recopilado por la Agencia Espacial Europea (ESA), donde la zona de estudio se encuentra la parte alta de la cuenca del Guadalquivir, que incorpora las categorías: agrícola, bosque, pasto y matorrales.

Tabla 4.1. Tipo de cobertura vegetal usada en el modelo WEAP “SellaQuebrada_1”.

Unidades Hidrológicas	UH_Chaupicancha	UH_Chaupicancha2	UH_NegroMuerto	UH_NegroMuerto2
Agrícola [has]	82	79		
Bosque [has]	54			
Pasto [has]	3539	325	931	88
Matorrales [has]	2190	535	1460	309
Total =	5865	939	2391	397
Unidades Hidrológicas	UH_Jarcas	UH_SanPedrito	UH_Rumicancha	UH_Restante
Agrícola [has]			6	6
Bosque [has]				32
Pasto [has]	763	757	1138	341
Matorrales [has]	662	216	1030	837
Total =	1425	973	2174	1216

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.2. Clasificación de ESA-CCI-2010.



Fuente: ESA-CCI-2010.

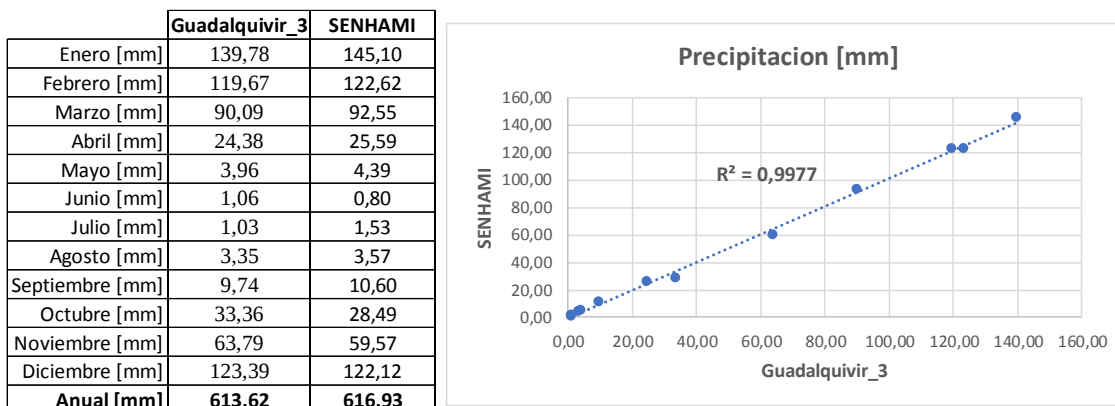
4.1.3. Incorporación y análisis de la información climática.

La información climática usada para la construcción del modelo es la del “Guadalquivir_3”, esta información es del Balance Hídrico Nacional 2023. La información se detalla en el subtítulo 3.2.2.

Para validar esta información se correlaciono los datos principales de precipitación y temperatura media de la unidad hidrológica “UH_Restante” ya que dentro de esta se

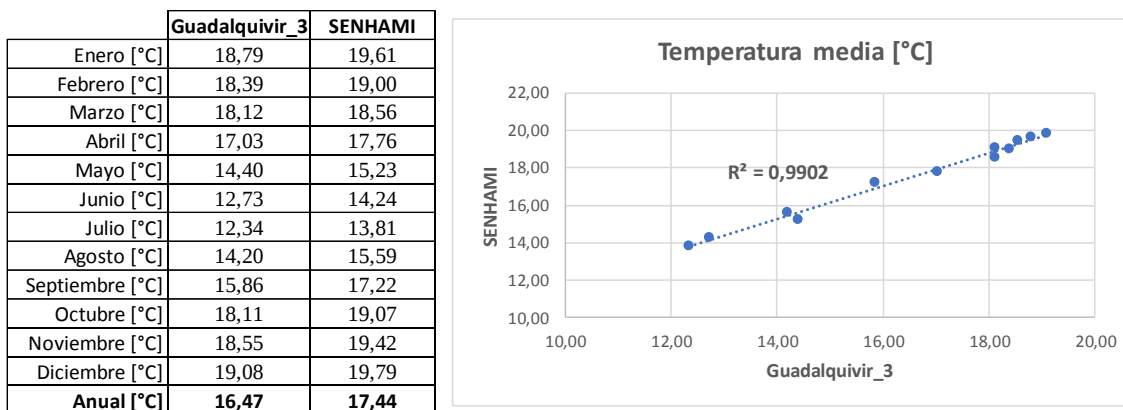
encuentra la estación Sella Quebradas. Los datos de las otras unidades hidrológicas no supondrán un cambio significativo en su validación.

Figura 4.2. Correlación de la precipitación para UH_Restante.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.3. Correlación de la temperatura media para UH_Restante.

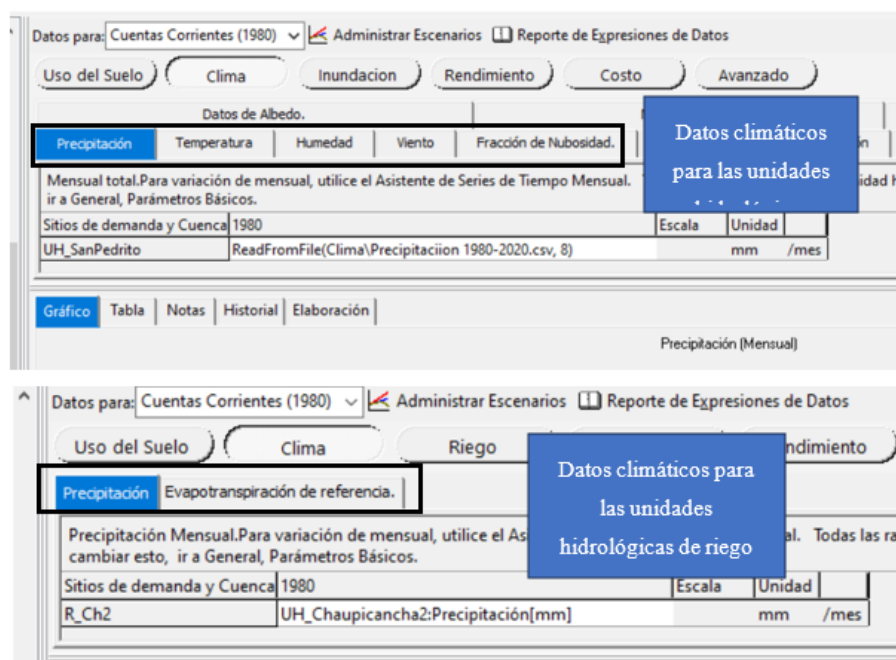


Fuente: Elaboración propia.

Como se observa se presenta una correlación muy buena para ambos parámetros.

La información fue cargada al modelo “SellaQuebrada_1” en formato “cvc”, para cada mes del periodo 1980 – 2020.

Figura 4.4. Información climática requerida por WEAP.



Fuente: Elaboración propia.

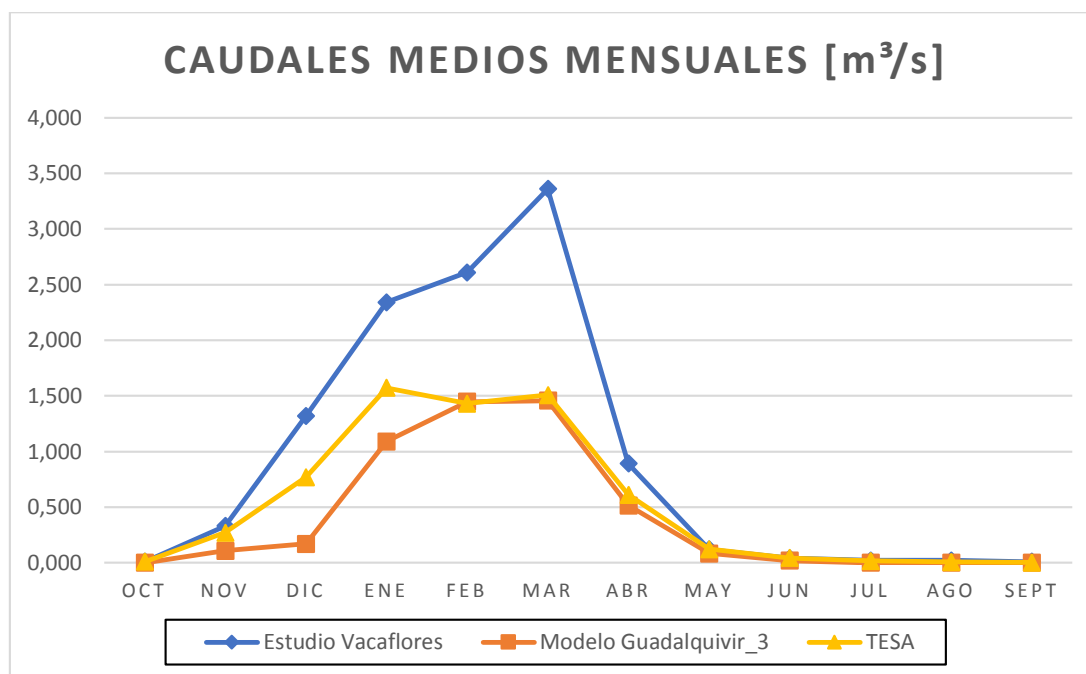
4.1.4. Incorporación y análisis de la información hidrométrica.

Tabla 4.3. Caudales medios mensuales de distintas fuentes de información.

Periodo de datos:		1980 - 1997	1980 - 2015	1978 - 2006
Años de registro:		11 años	35 años	28 años
Bibliografía:		Estudio Vacaflores	Modelo Guadalquivir_3	TESA
Estación hidrométrica:		Sella Quebradas		
Área de cuenca:	km²	143	143	143
Módulo	m³/s	0,92	0,36	0,53
Oct	m ³ /s	0,010	0,000	0,008
Nov	m ³ /s	0,330	0,108	0,270
Dic	m ³ /s	1,320	0,169	0,770
Ene	m ³ /s	2,340	1,089	1,571
Feb	m ³ /s	2,610	1,447	1,43
Mar	m ³ /s	3,360	1,456	1,506
Abr	m ³ /s	0,890	0,514	0,611
May	m ³ /s	0,120	0,083	0,122
Jun	m ³ /s	0,040	0,019	0,042
Jul	m ³ /s	0,020	0,000	0,017
Ago	m ³ /s	0,020	0,000	0,006
Sept	m ³ /s	0,010	0,000	0,003
Caudal específico	l/s/km²	6,45	2,85	3,70

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.5. Comparación de los caudales medios mensuales de distintas fuentes



Fuente: Elaboración propia.

Si bien se cuenta con información de tres fuentes, la única posible de utilizar es la del modelo “Guadalquivir_3”, ya que esta cuenta con caudales de cada mes correspondiente al periodo 1980 – 2015, se usó esto para la construcción de una mejor simulación, calibración y validación. Sin embargo, esta información es proporcionada en m³/s con precisión de un decimal lo que hace que en los meses de julio a septiembre tengan valores de cero, lo cual no ocurre así con exactitud según los caudales medios mensuales de las otras fuentes de información.

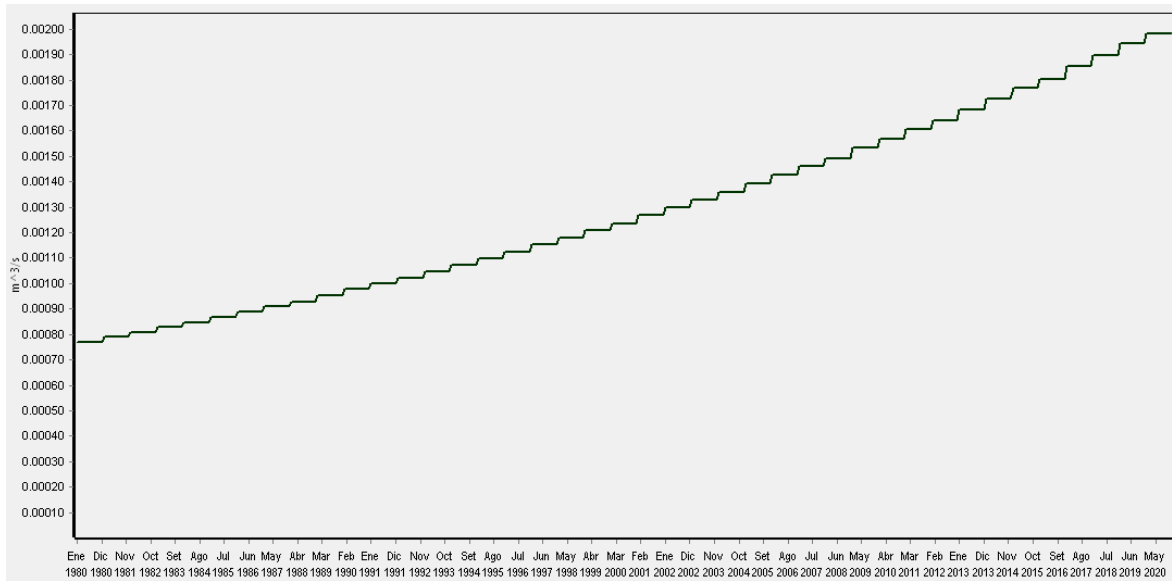
4.1.5. Incorporación y análisis de la información de demanda.

4.1.5.1. Demanda de agua potable.

Del modelo “Guadalquivir_3”, se identificó que el consumo de agua potable de la población correspondiente a la comunidad de Sella Quebrada, es satisfecha por el río perteneciente a la misma comunidad, del cual el consumo es satisfecho antes de la estación hidrométrica.

Con el número de habitantes de 1639, índice de crecimiento de 2,4% y un consumo de 100 l/hab/día del año 2018, se introdujo al modelo haciendo uso de la función “GrowthFrom” se procedió a rellenar el número de habitantes desde el año 1980 hasta 2020.

Figura 4.6. Consumo de agua potable del periodo 1980 – 2020.



Fuente: Elaboración propia.

4.1.5.2. Demanda de agua para riego.

Para el cálculo de la demanda de los cultivos, WEAP usa el método del coeficiente simplificado. Este método se empleó para estimar la demanda de riego. Los datos de entrada del método para la estimación de la demanda de riego del cultivo son la precipitación efectiva, coeficiente de cultivo (k_c) y la evapotranspiración de referencia (E_{To}), con estos datos el modelo realiza el balance del agua para simular la demanda. El método solo simula demandas de riego y no procesos de escorrentía, infiltración o cambios de humedad de suelo. Su formulación matemática y conceptual se basa en el reporte de Riego y Drenaje de la FAO (Guía para la determinación de requerimiento de agua de cultivos). (Allen et al, 1998:25).

La precipitación efectiva se define como la proporción de agua retenida en la capa radicular con relación a la cantidad de lluvia caída. Su magnitud depende, por un lado, de las características del terreno y por otra de las características de precipitación.

El Programa Nacional de Riego, en función a las características agroecológicas de las regiones de altiplano, valles y chaco; considera que no son efectivas las precipitaciones menores a 12, 15 y 20 mm respectivamente. Las lluvias mensuales, resultantes de la diferencia, son efectivas al 70, 75 y 80%. La expresión usada para el modelo que corresponde al valle, es la siguiente: $Pe = (P - 15) \times 0,75$.

Donde “P” es la precipitación media. Para esta expresión se aplica una condición en el modelo para que sea cero si la precipitación es menor a 15 mm.

El periodo en que cada cultivo requiere agua es determinado por los coeficientes de cultivo, los cuales fueron recopilados del modelo “Guadalquivir_3”.

Tabla 4.4. Coeficientes de cultivos usados para el modelo “SellaQuebrada_1”

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Arveja	0,4	0,77	1,15	1,02	0,9							
Avena	1,15	0,96	0,77	0,4						0,42	0,78	0,96
Cebolla			0,42	0,73	1,05	0,92						
Hortalizas			0,42	0,73	1,05	0,92						
Maíz			0,42	0,73	1,05	0,92						
Papa			0,42	0,73	1,05	0,92						

Fuente: Modelo WEAP “Guadalquivir_3”

Las áreas de cultivo fueron introducidas manualmente para cada unidad hidrológica de riego según la información recopilada de la tabla 3.25.

4.1.6. Generación de esquema base del modelo “SellaQuebrada_1” en WEAP.

De manera general los pasos para crear un esquema base en WEAP incluyen:

- 1) Crear un área nueva
- 2) Incorporación de shapefiles (coberturas SIG).
- 3) Delimitación de catchments en base a las coberturas o capas SIG (Modo delimitación automática de catchments).
- 4) Incorporación de datos climatológicos e hidrométricos.
- 5) Incorporación de datos de cobertura vegetal.
- 6) Incorporación de datos de demanda de agua.

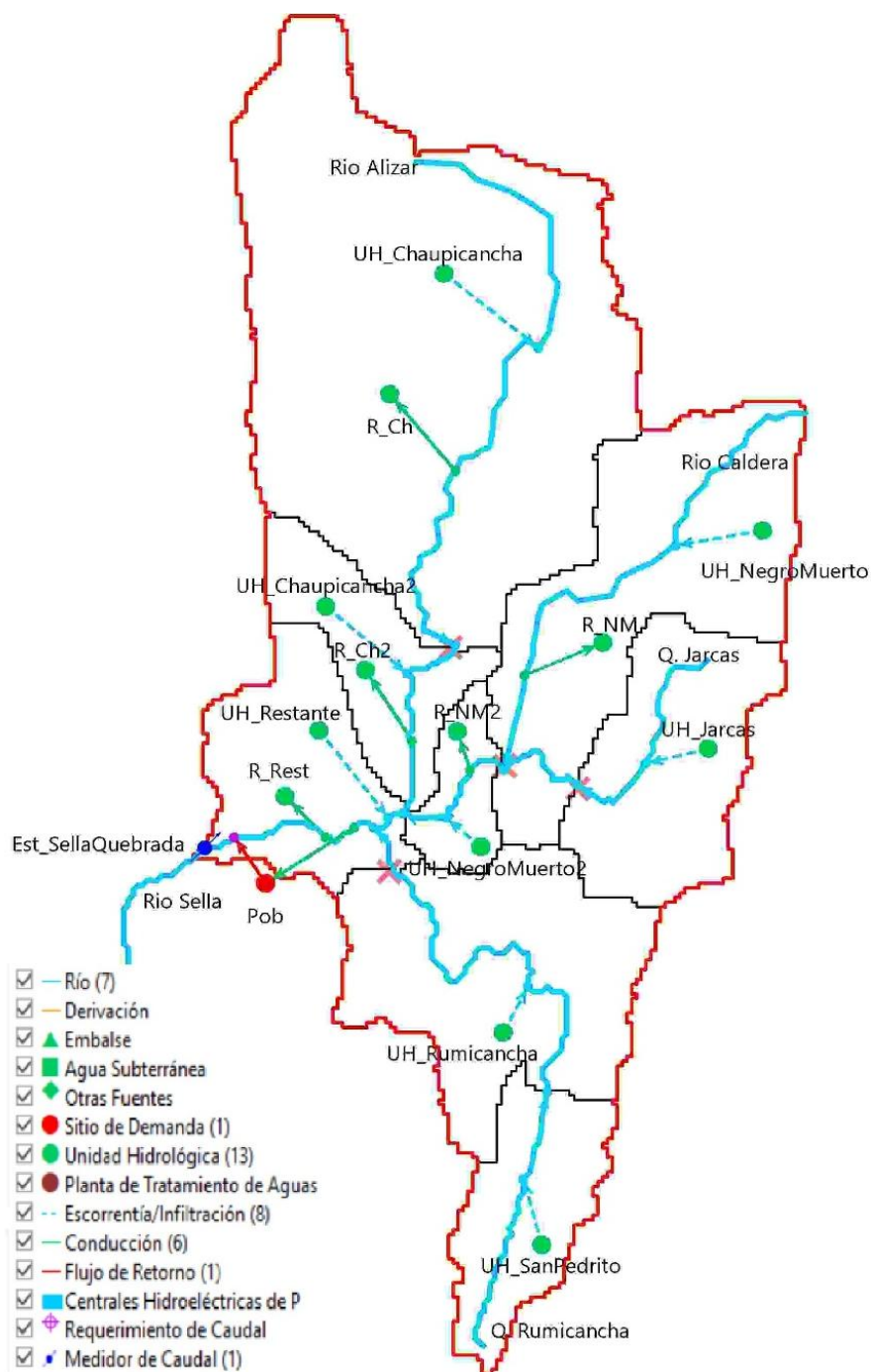
El modelo generado para la presente investigación cuenta con 8 unidades hidrológicas: UH_Chaupicanha, UH_Chaupicanha2, UH_NegroMuerto, UH_NegroMuerto2, UH_Jarcas, UH_SanPedrito, UH_Rumicanha y UH_Restante.

Cuenta con 5 unidades de riego: R_Ch, R_NM, R_NM2, R_Ch2 y R_Rest.

También cuenta con una población que genera una demanda de agua potable, denominado dentro del modelo “Pob”.

La estación hidrométrica introducida para la calibración y validación del modelo es la de Sella Quebradas, la cual tiene registros de aforos del río Sella; aguas arriba se encuentran los ríos: Alizar y Caldera; como también las quebradas de Rumicancha y Jarcas.

Figura 4.7. Esquema general del modelo WEAP “SellaQuebrada_1”, utilizado para la generación de los aportes mensuales.



Fuente: Elaboración propia.

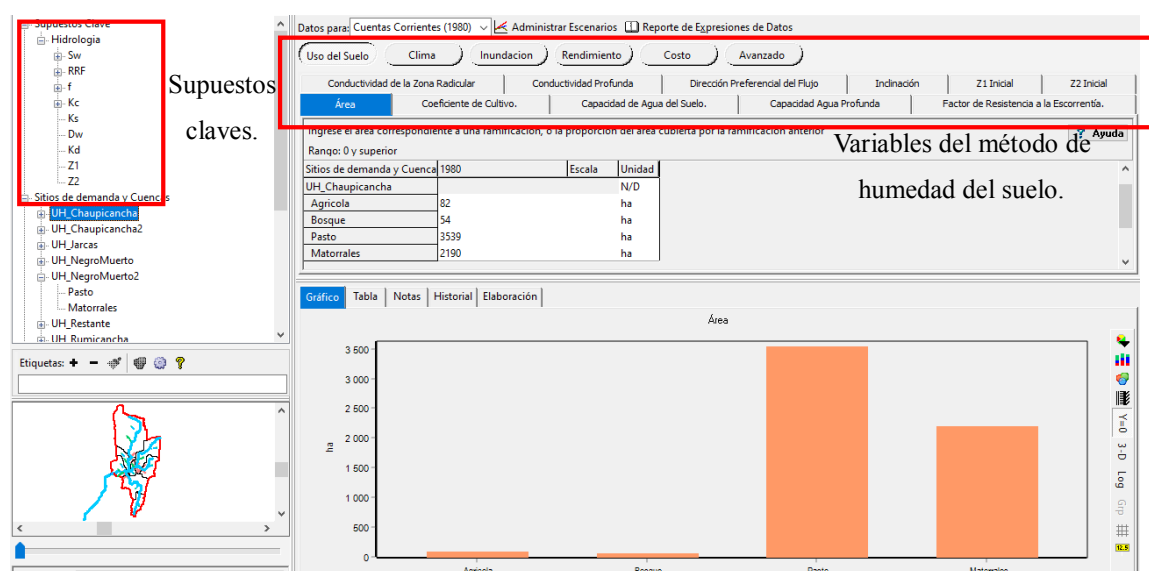
4.1.7. Estructura de datos en el interior de las unidades hidrológicas.

Los supuestos claves constituyen una de las herramientas básicas en WEAP. Estas pueden ser usadas con diferentes propósitos dentro de la construcción del modelo. Por ejemplo, en los supuestos claves se pueden incorporar los parámetros de uso de suelo usados en la calibración del modelo. Los supuestos claves también pueden ser usadas para la creación de funciones para obtener series de tiempo de precipitación y temperatura en todos los catchments del modelo a partir de las estaciones base (Centro de Cambio Global Universidad Católica de Chile, Stockholm Environment Institute, 2009).

Al ser un proceso iterativo la simulación de la escorrentía superficial de cada unidad hidrológica, los supuestos claves constituyen una herramienta importante en el proceso. Los supuestos claves creados en el modelo son las variables que conforman la estimación del balance hídrico por el método de la humedad del suelo; los parámetros son:

- **Sw:** Capacidad de almacenamiento de agua en la zona de raíces.
- **RRF:** Factor de resistencia a la escorrentía.
- **f:** Dirección preferencial de flujo.
- **Kc:** Coeficiente de cultivo.
- **Ks:** Conductividad de zona de raíces.
- **Dw:** Capacidad de almacenamiento de agua en la zona profunda.
- **Kd:** Conductividad de zona profunda.
- **Z1:** Nivel de humedad en la zona de raíces inicial.
- **Z2:** Nivel de humedad en la zona profunda inicial.

Figura 4.8. Ejemplo de introducción de supuestos claves al modelo “SellaQuebrada_1”.



Fuente: Elaboración propia.

La relación de los parámetros con el uso de suelo y cobertura vegetal, es la misma que la del modelo “Guadalquivir_3”. Para la clasificación del uso de suelo de las unidades hidrológicas (agrícola, bosque, pasto y matorrales), los valores Sw, RRF, f, y Kc, son para cada tipo de suelo, ya que estas tienen mayor influencia sobre la generación de caudales, el parámetro Ks igual tiene fuerte influencia, pero se decidió que este valor será general para toda la cuenca Sella Quebrada, ya que según los mapas de tipo de suelo de ZONISIG se presenta, en casi la totalidad un solo tipo de suelo. Los parámetros Dw, Kd, Z1 y Z2, son globales para toda la cuenca de estudio.

Para la creación del modelo se tomaron como valores iniciales los mismos del modelo “Guadalquivir_3”.

Tabla 4.5. Valores iniciales de supuestos claves para el modelo “SellaQuebrada_1”.

Uso de suelo	Sw	RRF	f	Kc	Ks	Dw	Kd	Z1	Z2
Agrícola	210	4	0,85	0,74	60	500	200	80	15
Bosque	220	5	0,65	1,05					
Pasto	300	4,5	0,85	0,8					
Matorrales	250	4,5	0,85	0,9					

Fuente: diagnóstico del modelo hidrológico weap para la actualización del modelo de toma de decisiones robustas en la gestión de los recursos hídricos en la cuenca del Guadalquivir. Gomez G., Sergio.

4.2. Calibración y validación del modelo WEAP.

4.2.1. Criterios para la calibración y validación del modelo.

En general, se busca ajustar tanto los caudales pico como los caudales base. Por ejemplo, para incrementar la respuesta de los caudales pico, es necesario modificar la escorrentía superficial, que se ve influenciada por el RRF y K_s , los cuales afectan la reactividad de las unidades hidrológicas.

Por otro lado, para influir en los caudales base, se deben ajustar los parámetros f y K_d . Un ejemplo de calibración podría ser aumentar la conductividad hidráulica en la zona profunda (K_d), lo que incrementaría la conductividad y, por ende, la descarga desde los perfiles más profundos, resultando en un aumento de los caudales base.

Asimismo, al aumentar la capacidad hídrica del perfil superior (S_w), se facilita un mayor flujo sub-superficial, lo que también contribuye al incremento de los caudales máximos. Por último, el parámetro de capacidad de retención de humedad en el perfil profundo (D_w) regula cómo se transmiten los flujos hacia los caudales base.

A continuación, se detalla la incidencia de cada parámetro sobre los parámetros de calibración:

- **Kc: Coeficiente de cobertura [-].**

El k_c afecta a la evapotranspiración potencial. Se elige un coeficiente que represente a la unidad hidrográfica; cuando se eleva el k_c el caudal simulado se reduce.

- **f: Dirección preferente del flujo.**

El f incide en el interflujo o flujo subsuperficial en la zona de raíces; al aumentar el valor de f existe un incremento en el escurrimiento superficial.

f indica la cantidad de agua que ingresa al contenedor inferior por medio de la percolación, cuando este valor es 0 indica que el flujo es vertical, cuando el valor es 1 señala que el flujo es horizontal y que no existe aporte al contenedor inferior.

- **Sw: Capacidad de almacenamiento de agua en zona de raíces [mm].**

Sw es un parámetro que depende de la textura, la profundidad de la zona de raíces que se relaciona con el tipo de cobertura vegetal presente, para este valor se ajusta por medio de un factor regional.

- **Ks: Conductividad de la zona de raíces [mm/mes].**

Ks incide en el interflujo; al elevar dicho valor se reduce el escurrimiento superficial. El parámetro influye en la percolación al aumentar el ingreso de agua en el balde inferior.

- **RRF: Factor de resistencia a la escorrentía [-].**

El RRF afecta el escurrimiento superficial y el interflujo del modelo; al elevar dicho valor se incrementa el caudal en el punto de aforo, este parámetro mantiene según las tablas y valores recomendados en las bibliografías.

- **Z1: Nivel de humedad en la zona de raíces [%].**

Z1, la fracción inicial de almacenamiento en la zona de raíces, se obtiene mediante un proceso iterativo de ensayo y error. Una vez que ajustado Kc, f, Sw, Ks, RRF, se obtiene un valor representativo de este suelo (1%), y se obtiene el valor promedio de Z1 para todas las combinaciones cobertura-textura, como valor representativo se obtiene el promedio del mes inicial.

- **Kd: Conductividad profunda [mm/mes].**

Kd se obtiene en el proceso de calibración; este parámetro incide en el flujo base, e interfiere al disminuir el valor de escurrimiento en época de estiaje, es importante el valor para ajustar el modelo.

- **Dw: Capacidad de agua profunda [mm].**

Dw es un parámetro que se debe calibrar y se encuentra en la parte inferior del balde.

- **Z2: Nivel de humedad en la zona profunda [%].**

Al igual que el parámetro Z1, se obtiene el porcentaje de Z2 mediante un proceso iterativo. Este es un aspecto importante del interflujo cuando se encuentra agua en época de lluvia y

disminuye en época de estiaje, siendo fundamental realizar una calibración adecuada para obtener una relación entre los niveles iniciales Z1 y Z2.

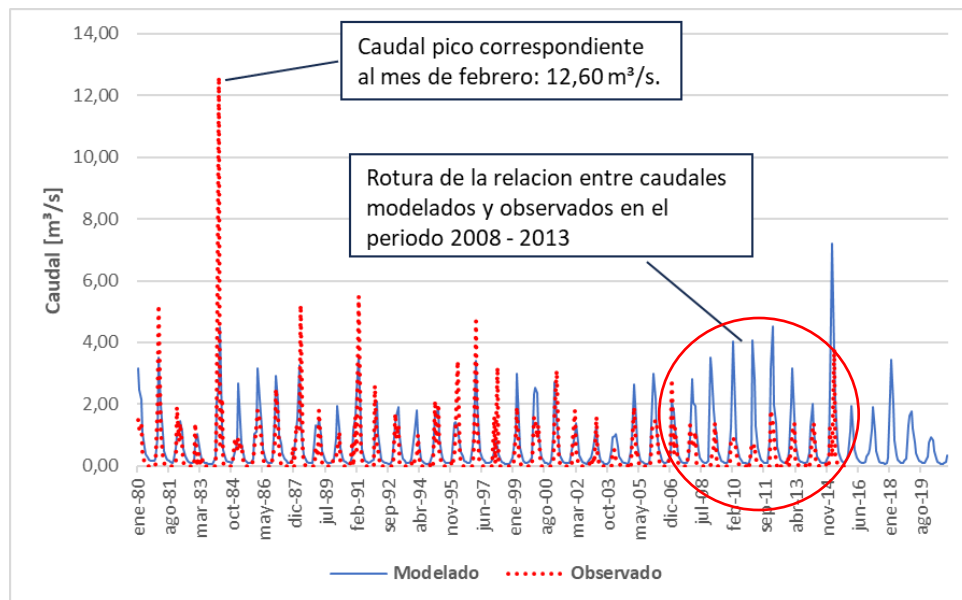
Nota: estas recomendaciones fueron recopilados de distintas bibliografías, sin embargo, no siempre se cumple esto, ya que cada modelo es único, según las características climáticas, usos de suelo y tipo de coberturas vegetal, pueden variar.

4.2.1. Selección de los periodos de calibración y validación del modelo.

La estación hidrométrica de Sella Quebrada viene rodeada de incertidumbre y dudas sobre las mediciones de sus caudales, ya que no se cuenta con información disponible para su estudio. Los datos de registro de caudales más amplios de esta estación, se puede extraer del modelo WEAP “Guadalquivir_3”, que cuenta con datos a nivel mensual entre los periodos 1980 – 2015. Demás fuentes bibliográficas cuentan directamente con caudales medios mensuales. El estudio TESA cuenta con registros mensuales, pero no cuentan con datos completos en el periodo mencionado, sino que sus registros mensuales son discontinuos. Dado a esta situación se tomó especial atención en la selección del periodo de calibración y validación.

Para la selección del dicho periodo, se realizó un análisis entre los caudales observados y los generados por el modelo (con supuestos claves iniciales de la tabla 4.5).

Figura 4.9. Caudales modelados y observados.



Fuente: Elaboración propia.

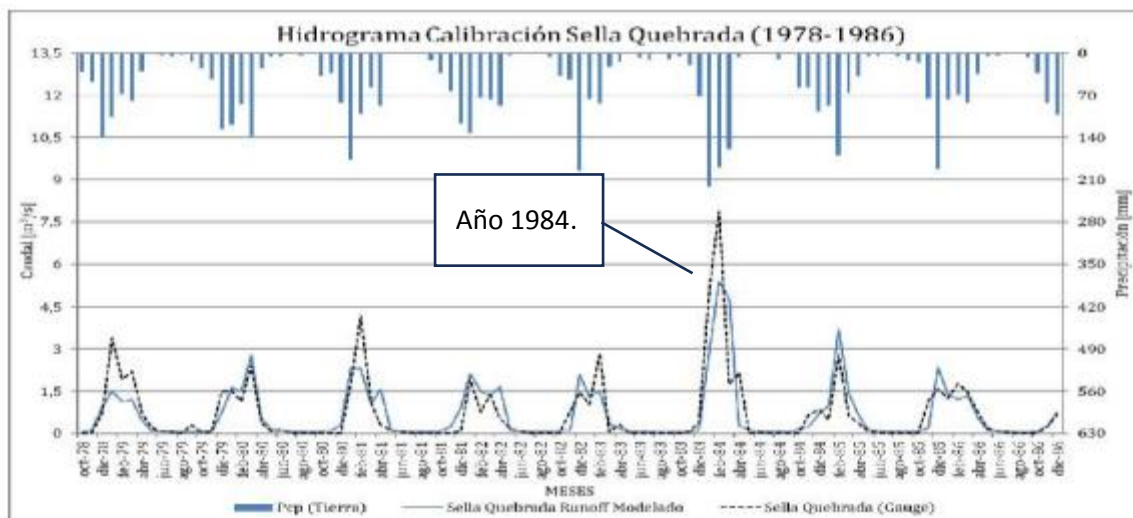
Se detecto dos observaciones, la cuales se pueden observar en la figura 4.9., a continuación, se detalla el análisis como las conclusiones asumidas respecto a esto.

1) Caudal pico correspondiente al mes de febrero: 12,60 m³/s.

Se puede evidenciar que los caudales aforados (observado), no sobrepasan un caudal de 7.5 m³/s, excepto el registrado en febrero de 1984. En el proceso de “prueba y error” para la calibración del modelo, este registro no permitía un ajuste optimo, lo que llevo a realizar un análisis de este dato.

Los aforos presentados por el estudio TESA, no cuenta con registro de ese mes y de ese año (Fuente SENHAMI). A raíz de esto, en la búsqueda de alguna bibliografía para validar este dato, se encontró la TESIS “Evaluación de la precipitación mediante distintas fuentes de información (satélites y grillas) usadas en modelo lluvia - escurrimiento en la cuenca alta del rio guadaluquivir” elaborado por Romero S., Mauricio, en el año 2019, en el cual se muestra la siguiente gráfica, donde se observa que los registros no superan un caudal de 7,3 m³/s.

Figura 4.10. Hidrograma de calibración para la Cuenca Sella Quebrada, periodo 1978 – 1986.



Fuente: Evaluación de la precipitación mediante distintas fuentes de información (satélites y grillas) usadas en modelo lluvia - escurrimiento en la cuenca alta del rio Guadalquivir”.

Romero S., Mauricio.

También se observó las precipitaciones mensuales del año 1984, descargadas de SENHAMI, así como las precipitaciones máximas diarias correspondientes al mes de febrero del mismo

año, no se evidencia que existe un registro significativo, en relación a otros años y meses, que pueda dar lugar a la confirmación de la existencia de este evento.

Por tanto, a raíz de esto, se decidió no tomar en cuenta el registro de caudales de este año para la calibración del modelo, debido a la incertidumbre e inseguridad generada.

2) Rotura de la relación entre caudales modelados y observados en el periodo 2008 – 2013.

El método usado en WEAP es el de humedad del suelo, el cual tiene fuerte relación con las precipitaciones. Desde el año 2008 hasta el 2013, las precipitaciones anuales no registran un decremento con relación a otros periodos pasados, lo cual no justifica una disminución del caudal observado, como se muestra en la figura 4.9.

Los caudales mejores registrados son los caudales pasados, ya que estos no tienen tanta influencia por parte del hombre. En la cuenca de estudio se destaca la actividad agropecuaria como sustento económico de la mayoría de las familias del lugar, y el incremento de la población genera que esta actividad consuma más agua, de los diferentes afluentes del río Sella, lo que puede generar un mal registro de la estación hidrométrica, sin embargo, esto afectaría mayormente a los meses críticos, donde la población recurre a la construcción de atajados (improvisados en su mayoría) para sostener su actividad agropecuaria en los meses secos.

El quiebre abrupto de la relación de los caudales observados y modelados del periodo 2008 – 2013, se puede dar a diferentes factores, por tanto, para la seguridad y obtener una simulación óptima, se decidió descartar el periodo mencionado.

El año 2015 cuenta con caudales registrados de valor cero en los meses de noviembre y diciembre, lo que genera duda sobre la realidad de eso, por tanto, el periodo de estudio, asumido para la calibración y validación del modelo, será en los años 1980 – 2007.

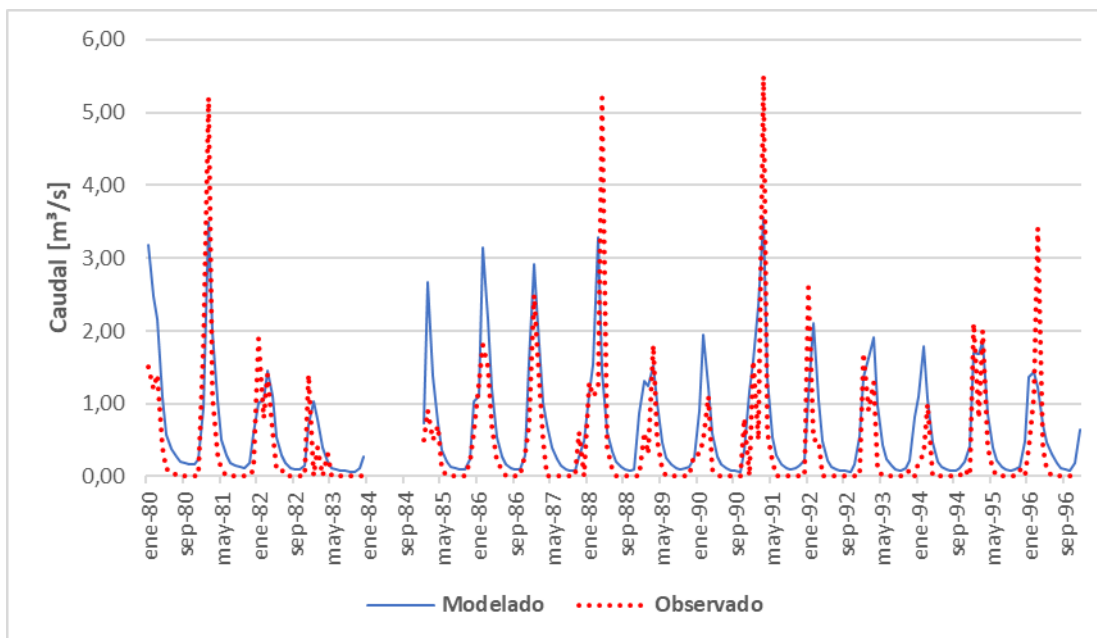
4.2.2. Calibración del modelo.

4.2.2.1. Aspectos a considerar para la calibración a partir de la primera iteración del modelo.

El periodo de calibración asumido es de los años 1980 – 1996 (sin 1984), siendo un 60% de datos del periodo de estudio (1980 – 1983 y 1985 – 1996). Los supuestos claves asumidos

para una primera iteración son los mismos del modelo “Guadalquivir_3”, detallados en la tabla 4.5., donde se obtuvo los siguientes resultados:

Figura 4.11. Caudales modelados vs. Observados (primera iteración del modelo).



Fuente: Elaboración propia.

A simple vista, se observa que el modelo sobreestima los caudales en varios meses, especialmente durante los meses secos, donde los caudales simulados no disminuyen tanto como los observados. Esto sugiere que algunos parámetros clave relacionados con la escorrentía superficial y subsuperficial podrían requerir ajustes.

Con base en los valores iniciales de los supuestos claves y el comportamiento del modelo, se puede enfocar los ajustes en algunos de los siguientes parámetros para mejorar la calibración:

- 1) **Sw (capacidad de almacenamiento de agua en la zona de raíces):** Ajustar el almacenamiento disponible de agua en el suelo, de acuerdo con el tipo de uso del suelo, podría modificar el comportamiento de la escorrentía superficial y subsuperficial. Un Sw más bajo podría limitar la cantidad de agua disponible para infiltración y escorrentía subsuperficial en los meses secos.
- 2) **RRF (factor de resistencia a la escorrentía):** Este parámetro controla la proporción de la precipitación que se convierte directamente en escorrentía superficial. Un valor

más bajo de RRF podría reducir la escorrentía superficial, ajustando los caudales hacia abajo en los meses secos.

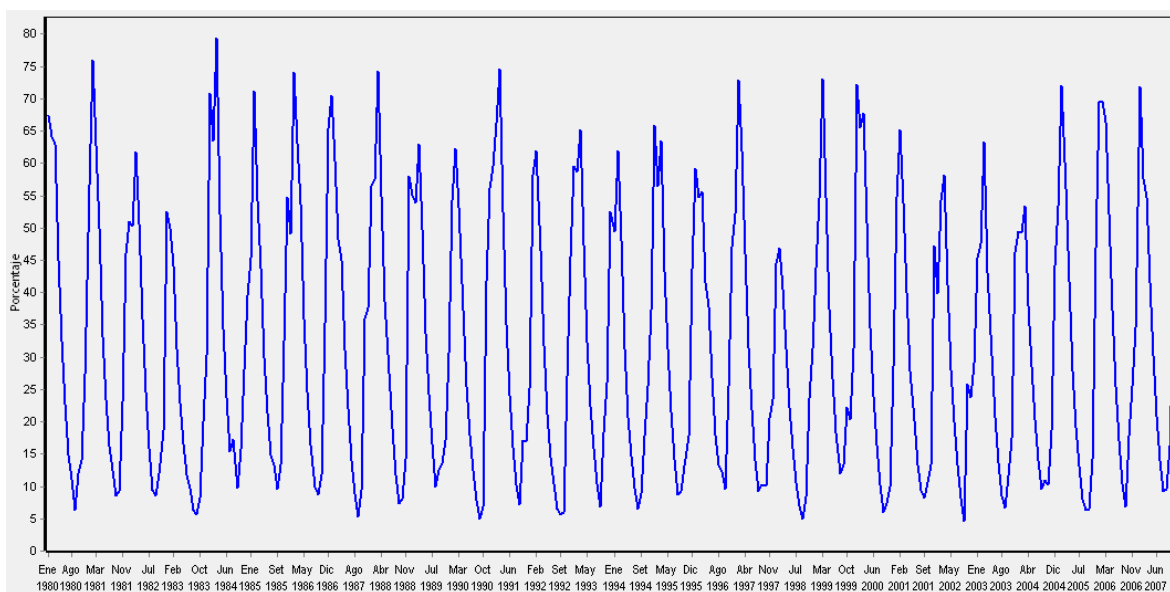
- 3) **f (dirección preferencial de flujo):** Un valor demasiado alto de este parámetro podría estar contribuyendo al exceso de flujo base en los meses secos. Reducir ligeramente este valor podría ayudar a ajustar mejor los caudales simulados.
- 4) **Kc (coeficiente de cultivo):** Este parámetro afecta la evapotranspiración y la demanda de agua del suelo. Ajustar los valores de Kc puede influir en cómo el modelo distribuye el agua disponible en el suelo.
- 5) **Ks (conductividad de zona de raíces):** Determina la velocidad a la que el agua puede moverse a través del suelo hacia las capas más profundas. Un valor más bajo de Ks reduce la infiltración del agua, disminuyendo así la contribución al flujo subsuperficial y al flujo base.
- 6) **Dw (capacidad de almacenamiento de agua en la zona profunda) y Kd (conductividad de zona profunda):** estos parámetros se pueden ajustar de manera iterativa una vez ajustados las 5 variables anteriores.
- 7) **Z1 (nivel de humedad en la zona de raíces inicial):** Su valor va desde 0 hasta 100%, que representa lo siguiente:

0: El balde superior comienza vacío y retendrá mucha humedad en los primeros pasos de tiempo.

100: El balde superior comienza a plena capacidad y retendrá poca humedad en los primeros pasos de tiempo.

Este valor se puede calibrar con la ayuda de la figura 4.12.

Figura 4.12. Humedad relativa del suelo 1(%) – primera iteración del modelo.



Fuente: Elaboración propia.

Este gráfico muestra un resultado de la dinámica del uso de la tierra de la unidad hidrológica modelada. La humedad relativa del suelo 1 (%) representa la humedad del suelo en la cubeta superior de la estructura de 2 cubetas del método de humedad del suelo de captación. El balde superior de la unidad hidrológica se ve afectado por el uso del suelo designado en el modelo, así como por las estaciones. Excepto en circunstancias extremas (sequías de varios años), la humedad relativa del suelo 1 (%) debe permanecer estable a lo largo del tiempo, incluso cuando muestra patrones estacionales (Stockholm Environment Institute, 2009).

La figura 4.12. muestra un comportamiento cíclico y podría considerarse aceptable, sin embargo, su comportamiento será observado periódicamente en el proceso de calibración.

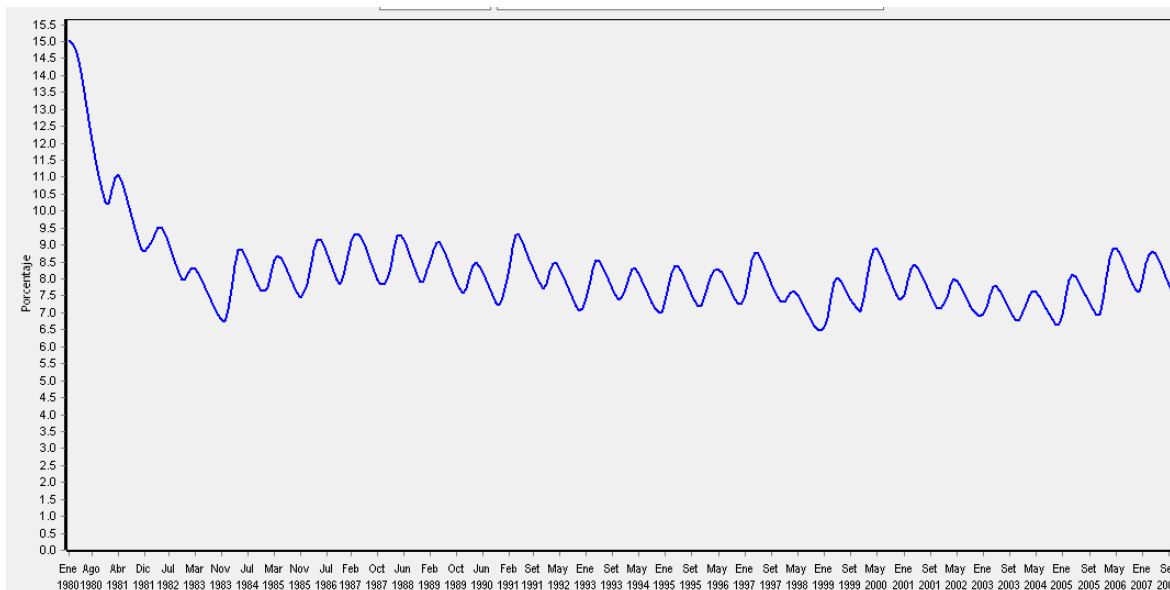
Otra manera de calibrar este valor es observar el comportamiento de los caudales simulados a principios del periodo de calibración, según la figura 4.11., se observa que el caudal al inicio es mayor que el modelado, lo que sugiere un decremento de este valor para retener más humedad al principio.

8) Z2 (nivel de humedad en la zona profunda inicial):

Las condiciones son las mismas que “Z1”, solo que esta representa la humedad del suelo del balde inferior de la unidad hidrológica modelada. El cubo inferior es más profundo, no se ve afectado por el uso de la tierra y menos afectado por las estaciones debido a su separación de

la superficie. Es aceptable una ligera variación estacional y no debe haber ninguna tendencia (ni creciente ni decreciente) a lo largo del tiempo.

Figura 4.13. Humedad relativa del suelo 2 (%) – primera iteración del modelo.



Fuente: Elaboración propia.

La tendencia decreciente que se observa en este ejemplo de cubeta inferior podría indicar uno o más de varios problemas:

- La condición inicial para la humedad del suelo en el balde inferior es demasiado alta.
- No se está filtrando suficiente agua en el balde inferior.
- El agua sale de la cubeta demasiado rápido porque:
 - La conductividad es demasiado alta.
 - El cubo es demasiado pequeño, por lo que el tiempo de transporte es muy corto.

Un buen punto de partida puede ser un valor promedio del periodo más estable.

A base de estas observaciones se dio lugar al proceso de calibración, el cual se lo realizó para unas 23 corridas, hasta obtener valores aceptables (de uno o más), de las medidas estadísticas mostradas en la tabla

Tabla 4.6. Medidas estadísticas para la evaluación del desempeño de los caudales observados vs. simulados.

Medida estadística	Valores ideales y aceptables	Interpretación
Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE).	El valor ideal es 1, valores > 0,5 = aceptable > 0.6 = deseado > 0,7 = bueno > 0,8 = muy bien	Qué tan bien el caudal modelado coincide con el caudal observado.
Eficiencia Kling-Gupta (KGE).	El valor ideal es 1. - Los valores deseados están por encima de 0,8 (Stockholm Environment Institute, 2009). - Un modelo hidrológico se considera satisfactorio si KGE > 0.50. (Boris F. Ochoa-Tocachi)	Compila tres métricas: correlación de valores simulados y observados, sesgo del modelo y simulación de variaciones de caudal.
Porcentaje de sesgo (PBIAS).	Un modelo hidrológico se considera satisfactorio si $PBIAS \leq \pm 25 \%$	Tendencia de sobreestimación o subestimación constante de los flujos/coincidencia del volumen total simulado con el observado
Relación entre el error cuadrático medio y la desviación estándar (RSR).	Un valor ideal es cero, pero los valores inferiores a 0,7 se consideran buenos.	Una medida de cuánto se desvían los flujos simulados de los hidrogramas observados.
Coefficiente de correlación de Pearson, r.	Si $r = 1$ existe una relación lineal positiva perfecta.	Describe el grado de colinealidad entre los datos simulados y medidos.
Coefficiente de determinación de Pearson, r^2.	El valor ideal es 1, los valores de 0,5 a 1 se consideran aceptables.	Es un índice del grado de relación lineal entre los datos observados y simulados.

Fuente: Elaboración propia con apoyo de “Tutorial”, Stockholm Environment Institute y “Guía de Modelación hidrológica para la infraestructura natural”, Boris F. Ochoa-Tocachi.

4.2.2.2. Resultado de la calibración.

Luego del proceso de iteración, en la tabla 4.7. se muestra los valores finales a los cuales se ajustó cada parámetro para poder obtener un mayor ajuste de los caudales simulados frente a los observados.

Tabla 4.7. Valores definidos de supuestos claves para el modelo “SellaQuebrada_1”.

Uso de suelo	Sw	RRF	f	Kc	Ks	Dw	Kd	Z1	Z2
Agrícola	195	3,8	0,99	0,8	18	700	500	65	1,5
Bosque	205	4,2	0,84	1,05					
Pasto	285	4,3	0,96	0,85					
Matorrales	235	4,1	0,97	0,9					

Fuente: Elaboración propia.

Para establecer el grado de correspondencia entre los valores observados y los valores modelados se procedió a estimar sus medidas estadísticas para evaluar el desempeño del modelo.

Tabla 4.8. Medidas estadísticas para la calibración del modelo.

Medida estadística	Valor obtenido	Descripción
NSE	0,55	Aceptable
KGE	0,66	Aceptable
PBIAS	0,72%	Muy satisfactorio
RSR	0,67	Bueno
r	0,74	Buena relación
r ²	0,55	Aceptable

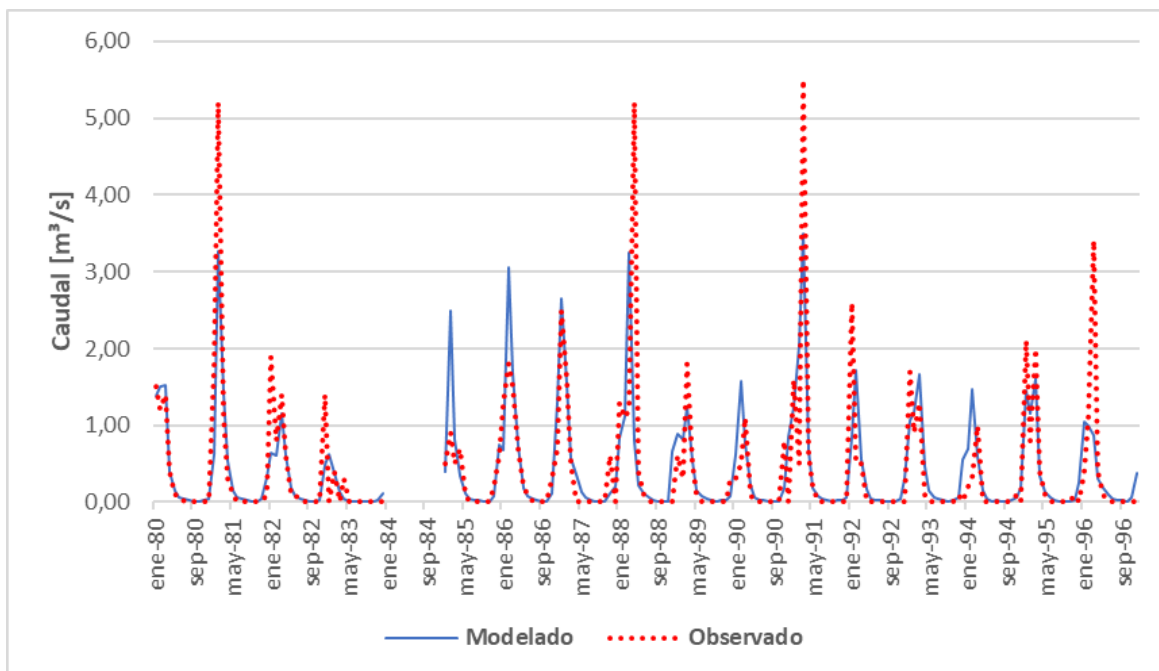
Fuente: Elaboración propia.

La medida PBIAS indica una sobreestimación de 0,72% de los caudales modelados sobre los observados, lo cual se considera muy satisfactorio, teniendo en cuenta que los registros de los caudales observados, presenta registros de 0 en los meses secos (julio a octubre), lo cual se evidencio que no es del todo cierto según otras bibliografías, aparte de que el PBIAS es muy cercano a 0.

El coeficiente de correlación de Pearson (r), no tiene un criterio como tal para valores entre 0 y 1, su propósito es describir si los caudales modelados y observados, aumentan o disminuyen de manera similar. Un valor de $r = 0,74$, indica una buena relación entre los caudales simulados y observados en términos de dirección y tendencia.

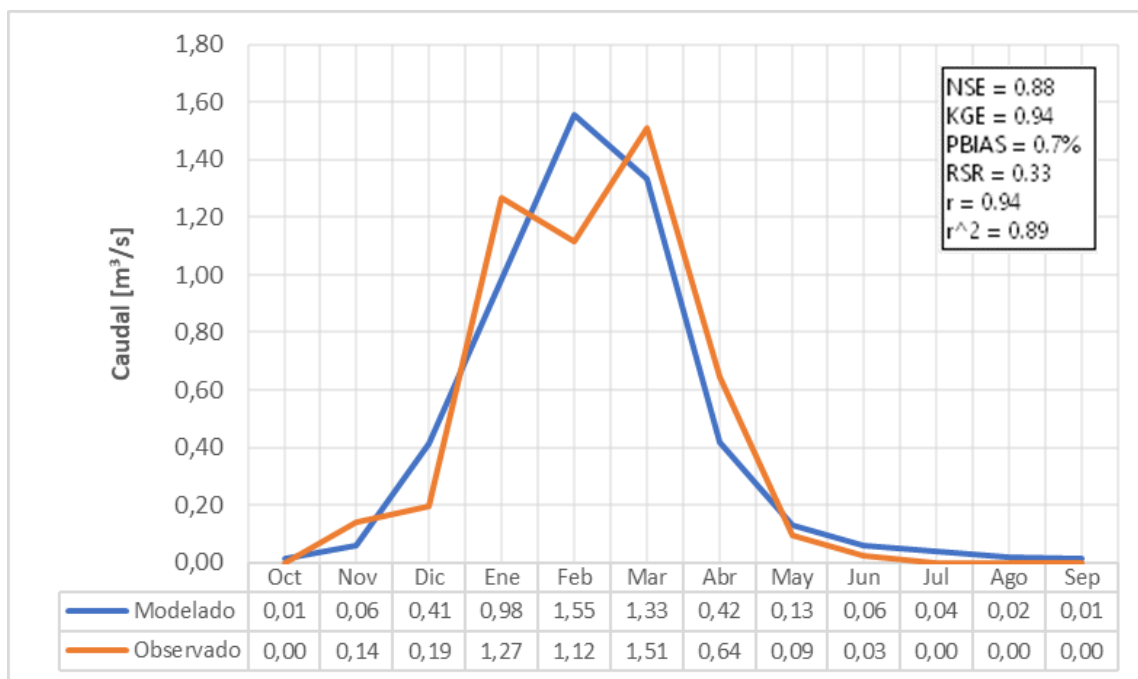
Un valor de $r^2 = 0,55$, indica que el modelo captura más de la mitad de la variabilidad de los caudales observados.

Figura 4.14. Caudales mensuales Modelados vs. Observados para la calibración.



Fuente: Elaboración propia.

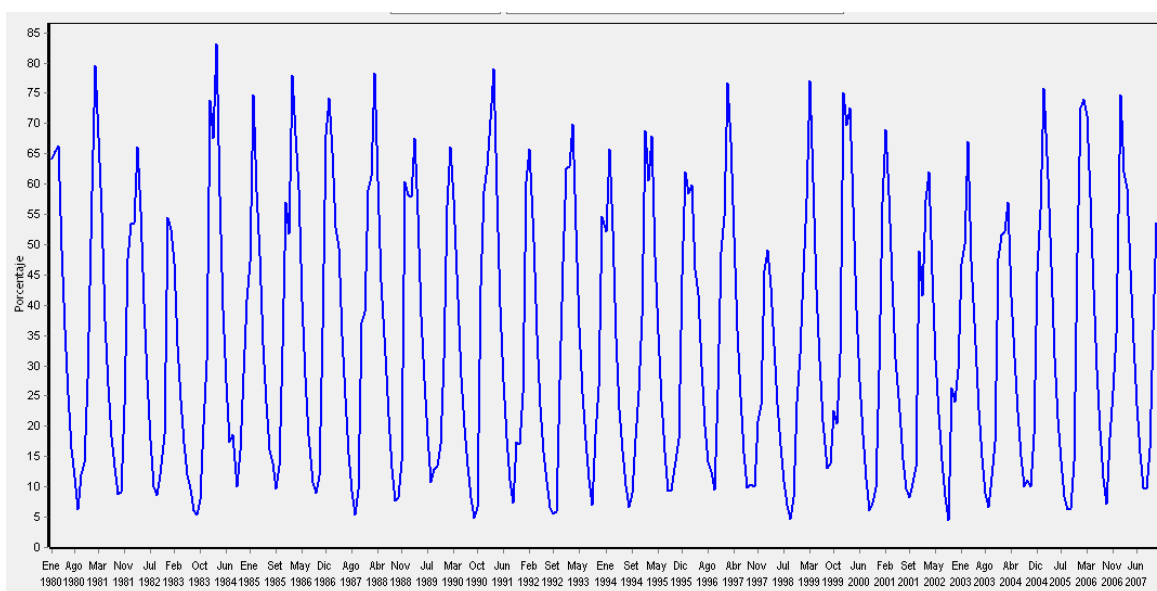
Figura 4.15. Caudales medios mensuales Modelados vs. Observados para la calibración.



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4.15., se observa que el modelo está subestimando los caudales en la mayoría de los meses, excepto los meses de enero y diciembre, en este caso puede ser aceptable los caudales obtenidos, ya que, en la hidrología, es mejor “menos caudal”, ya que esta sería una situación crítica al momento de tomar estos para el diseño de infraestructuras hidráulicas de almacenamiento. Sin embargo, este criterio no es del todo aceptable para cualquier situación, entonces se decidió recurrir a las medidas estadísticas, las cuales presentan valores muy buenos, no se hubiera aceptado valores por debajo de estos, ya que al ser valores medios mensuales (12 datos), se espera una mejor respuesta del modelo.

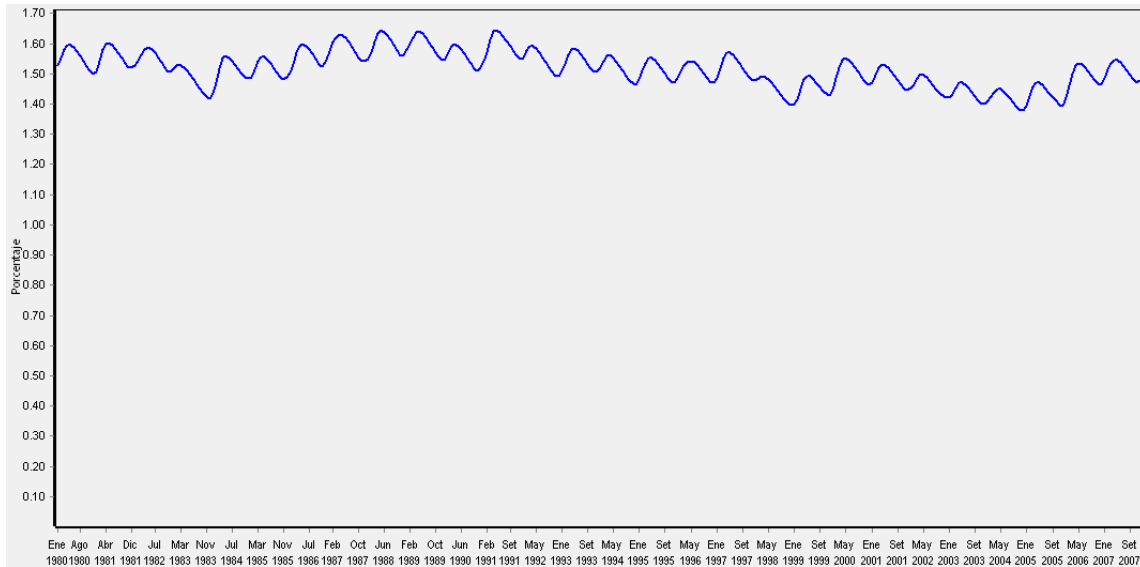
Figura 4.16. Humedad relativa del suelo 1 (%), calibración del modelo.



Fuente: Elaboración propia.

La figura 4.16. viene influenciada directamente por Z1, el cual se reducción de 80 a 65, cuidando en todo momento mantenga un comportamiento cíclico. Este parámetro se calibro de manera iterativa, hasta que los caudales de los primeros años se estabilizaran con respecto a los observados (ver figura 4.14.).

Figura 4.17. Humedad relativa del suelo 2 (%), calibración del modelo.



Fuente: Elaboración propia.

El valor Z2 se bajó hasta que la humedad relativa del suelo 2 se estabilice, el cual se tuvo que reducir, según la figura 4.13., muestra valores elevados los primeros años de la simulación. Este valor se bajó hasta lograr una estabilización del comportamiento cíclico como se muestra en la figura 4.17.

4.2.3. Validación del modelo.

4.2.3.1. Resultados de la validación.

En la práctica la validación verifica si el modelo calibrado tiene un desempeño adecuado en referencia a la predicción de caudales. Se aplica considerando datos de un periodo distinto al utilizado durante la calibración.

Para el proceso de validación lo ideal es tener un registro lo suficientemente extenso, para lo cual se usó un 40% de los datos del periodo de estudio, quedando así el análisis entre los años 1997 – 2007, con los parámetros (supuestos claves) adoptados en el proceso de calibración.

Luego de obtener un ajuste visual de los caudales medios mensuales, de igual manera que en el proceso de calibración, para establecer el grado de correspondencia entre los valores observados y los valores modelados se procedió a estimar sus medidas estadísticas para evaluar el desempeño del modelo.

Tabla 4.9. Medidas estadísticas para la validación del modelo.

Medida estadística	Valor obtenido	Descripción
NSE	0,59	Aceptable
KGE	0,75	Aceptable
PBIAS	2 %	Muy satisfactorio
RSR	0,64	Bueno
r	0,77	Buena relación
r²	0,6	Aceptable

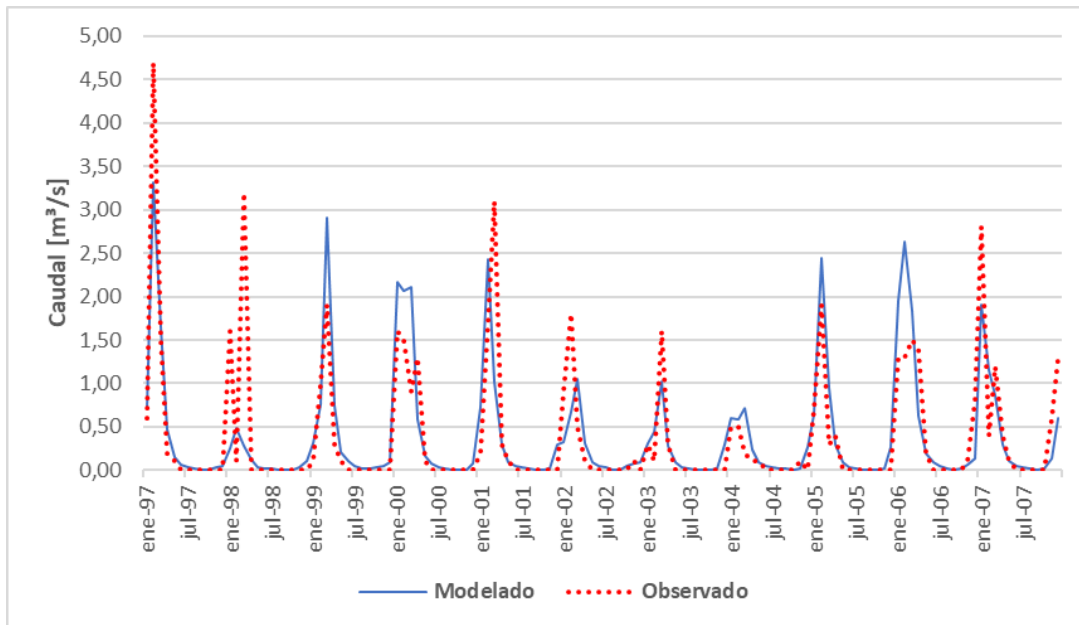
Fuente: Elaboración propia.

La medida PBIAS indica una sobreestimación des 2% de los caudales modelados sobre los observados, los cual se considera muy satisfactorio, teniendo en cuenta que los registros de los caudales observados, presenta registros de 0 en los meses secos (julio a octubre), lo cual se evidencio que no es del todo cierto según otras bibliografías, aparte de que el PBIAS es muy cercano a 0.

El coeficiente de correlación de Pearson (r) de $r = 0,77$, indica una buena relación entre los caudales simulados y observados en términos de dirección y tendencia. Un valor de $r^2 = 0,60$, indica que el modelo captura más de la mitad (60%) de la variabilidad de los caudales observados.

Para la validación del modelo se puede observar una mejora en todas las medidas estadísticas con respecto a las de calibración (tabla 4.8.), excepto el parámetro de PBIAS, pero sigue siendo bueno el ajuste.

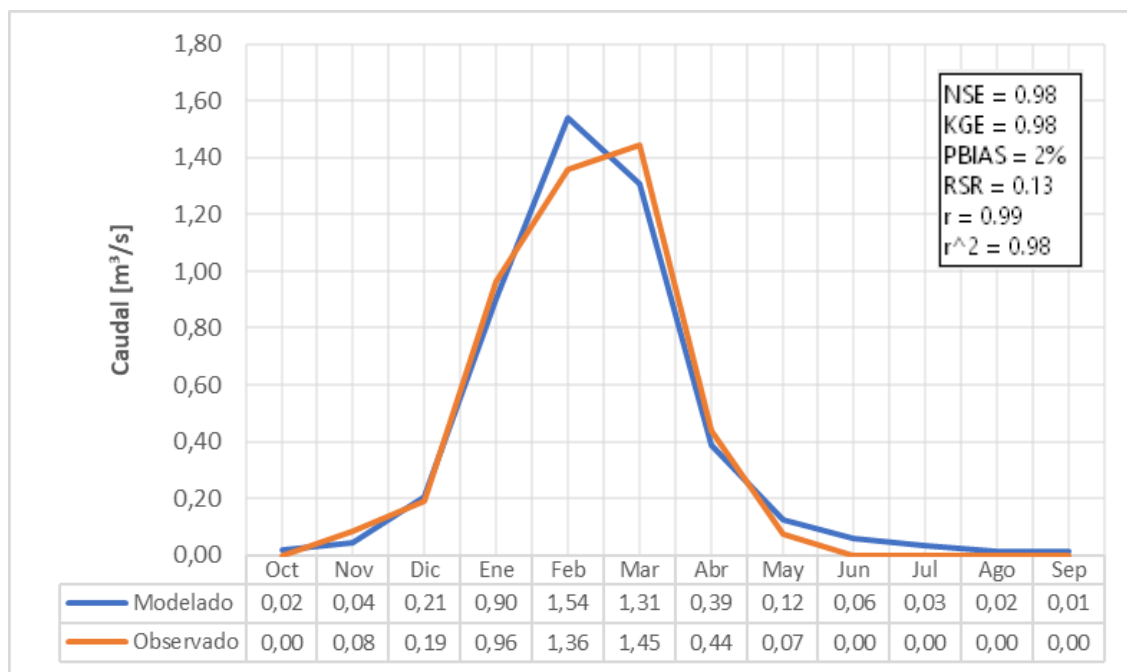
Figura 4.18. Caudales mensuales Modelados vs. Observados para la validación.



Fuente: Elaboración propia.

El periodo observado de caudales de 1998 presenta inconsistencia con respecto al modelado, sin embargo, a pesar de esto se mantiene para el proceso de validación ya que no existe evidencia para comprobar si este valor se presentó en la realidad o no.

Figura 4.19. Caudales medios mensuales Modelados vs. Observados para la calibración.



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4.19., se observa que el modelo está subestimando los caudales en los meses secos también se procedió a estimar las medidas estadísticas, las cuales presentan valores muy buenos, no se hubiera aceptado valores por debajo de estos, ya que al ser valores medios mensuales (12 datos), se espera una mejor respuesta del modelo.

Tanto visualmente como estadísticamente los resultados de caudales medios mensuales, es más aceptable que los generados en el proceso de calibración (figura 4.14.), por lo cual se concluye que el modelo esta validado.

4.2.3.2. Validación del modelo respecto a otros estudios.

Para realizar un análisis técnico y detallado de los caudales medios mensuales generados en el modelo WEAP en comparación con los datos recopilados de diferentes fuentes (Estudio Vacaflores, SENHAMI, Guadalquivir_3, TESA y el presente estudio), es fundamental identificar tanto las inconsistencias como los aspectos favorables. Esto permitirá validar la precisión del modelo y su capacidad para representar adecuadamente la hidrología de la cuenca de Sella Quebradas.

Tabla 4.10. Caudales medios simulados (1980 – 2007) en el estudio vs. Caudales medidos de otras fuentes.

Periodo de datos:		1980 - 1997	1980 - 1997	1980 - 2015	1978 - 2006	1980 - 2007
N° de datos:		13 años	13 años	35 años	28 años	27 años
Bibliografía:		Estudio Vacaflores	SENHAMI	Guadalquivir_3 (Observados)	TESA	Presente estudio
Estacion hidrometrica:		Sella Quebradas				
Área de cuenca:	km²	143	143	143	143	153,8
Módulo	m³/s	0,92	0,82	0,41	0,53	0,41
Oct	m ³ /s	0,010	0,010	0,000	0,008	0,015
Nov	m ³ /s	0,330	0,330	0,108	0,270	0,053
Dic	m ³ /s	1,320	1,320	0,169	0,770	0,328
Ene	m ³ /s	2,340	2,240	1,089	1,571	0,950
Feb	m ³ /s	2,610	2,410	1,447	1,430	1,549
Mar	m ³ /s	3,360	2,430	1,456	1,506	1,323
Abr	m ³ /s	0,890	0,890	0,514	0,611	0,405
May	m ³ /s	0,120	0,120	0,083	0,122	0,127
Jun	m ³ /s	0,040	0,040	0,019	0,042	0,059
Jul	m ³ /s	0,020	0,020	0,000	0,017	0,035
Ago	m ³ /s	0,020	0,020	0,000	0,006	0,017
Sept	m ³ /s	0,010	0,010	0,000	0,003	0,011
q específico	l/s/km²	6,45	5,73	2,85	3,70	2,64

Fuente: Elaboración propia.

A. Análisis comparativo de caudales mensuales.

Octubre: Los caudales reportados en todos los estudios son extremadamente bajos, típico de un mes de transición con escasa precipitación. Sin embargo, el presente estudio registra un valor ligeramente superior ($0,015 \text{ m}^3/\text{s}$) comparado con los demás. Aunque esto podría sugerir una leve sobrestimación en condiciones de baja precipitación, esta diferencia es pequeña y no afecta significativamente la tendencia general.

Noviembre: El modelo WEAP subestima el caudal ($0,053 \text{ m}^3/\text{s}$) en comparación con los valores más altos registrados por SENHAMI y Vacaflores ($0,330 \text{ m}^3/\text{s}$). Este resultado puede estar relacionado con una menor representación de los eventos de precipitación temprana en la temporada de lluvias, lo cual es una característica a monitorear, pero no una falla crítica del modelo.

Diciembre: En diciembre, el modelo WEAP estima un caudal de $0,328 \text{ m}^3/\text{s}$, un valor que se encuentra significativamente por debajo de los reportados por Vacaflores y SENHAMI ($1,320 \text{ m}^3/\text{s}$), pero es más cercano al valor observado en Guadalquivir_3 ($0,169 \text{ m}^3/\text{s}$). Esta diferencia notable con estudios anteriores podría indicar que el modelo captura bien una parte del comportamiento estacional, pero subestima los picos de caudal registrados en años previos. Aun así, el modelo ofrece una representación válida para evaluar las condiciones promedio de caudal en diciembre, aunque no refleja completamente las variaciones extremas observadas históricamente.

Enero a marzo: Durante los meses de mayor caudal, el modelo WEAP muestra valores inferiores en enero y marzo ($0,950 \text{ m}^3/\text{s}$ y $1,323 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente) en comparación con SENHAMI y Vacaflores, que reportan valores significativamente más altos. Sin embargo, en febrero, el modelo presenta una ligera sobrestimación ($1,549 \text{ m}^3/\text{s}$) en relación con los otros estudios. Este patrón refleja la dificultad de capturar eventos de precipitación intensa y variabilidad anual en modelos hidrológicos, pero el modelo sigue manteniendo una tendencia general coherente con los picos estacionales.

Abril a septiembre: En los meses secos, el modelo tiende a subestimar los caudales, lo cual es positivo, ya que refleja adecuadamente las condiciones de sequía. Los valores en junio y julio son ligeramente superiores a los observados en Guadalquivir_3, lo que puede sugerir

una ligera sobrestimación del flujo base. Sin embargo, la baja variabilidad en estos meses indica que el modelo está representando correctamente los flujos mínimos de la cuenca.

B. Aspectos positivos del modelo WEAP “SellaQuebrada_1”.

Consistencia estacional: El modelo WEAP capta de forma efectiva las variaciones estacionales, representando correctamente los aumentos en la temporada de lluvias y la reducción progresiva hacia la época seca. Esto es crucial, ya que asegura que el modelo refleja de manera precisa los patrones hidrológicos básicos y la dinámica general de la cuenca.

Adecuación en la temporada seca: Los caudales simulados durante los meses secos (mayo a octubre) se mantienen en niveles bajos y consistentes con los estudios previos, lo que sugiere una correcta representación de los caudales base y una gestión adecuada de los flujos subterráneos en el modelo. Esta consistencia es un indicador favorable de la precisión del modelo en condiciones de baja disponibilidad hídrica.

Caudal específico: El valor del caudal específico en el presente estudio (2,64 l/s/km²) es comparable al del estudio Guadalquivir_3 (2,85 l/s/km²). Esta proximidad sugiere que el modelo WEAP ha captado correctamente la capacidad de producción de agua de la cuenca en relación con su área, a pesar de las pequeñas diferencias en el área de cuenca considerada en cada estudio.

Módulo anual: El módulo anual (0,41 m³/s) es consistente con los valores promedio observados en Guadalquivir_3 y TESA, lo cual confirma que el modelo WEAP está alineado con las condiciones hidrológicas promedio de la cuenca a lo largo del periodo de estudio.

C. Consideraciones y observaciones técnicas.

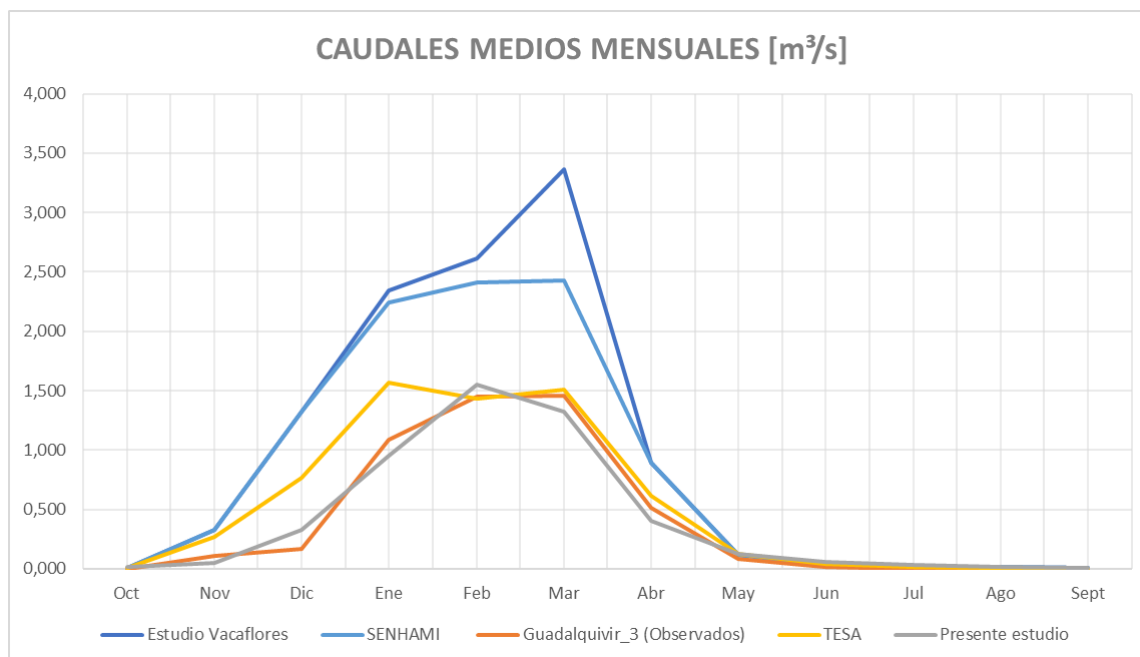
Subestimación en meses clave de la temporada de lluvias: La subestimación observada en enero y marzo en comparación con los estudios de SENHAMI y Vacaflares puede explicarse por la variabilidad interanual y la complejidad de captar eventos extremos. Esta variabilidad no representa un desajuste significativo en el modelo, ya que los resultados siguen siendo razonablemente consistentes con la tendencia general.

Ligera sobrestimación en febrero: Aunque el modelo presenta un valor más alto en febrero, esta discrepancia es menor y puede asociarse con fluctuaciones meteorológicas locales no

contempladas en otros estudios. Además, el modelo WEAP sigue mostrando un comportamiento coherente con la tendencia general de los caudales, por lo que esta sobrestimación no afecta gravemente su validez.

D. Conclusión.

Figura 4.20. Caudales medios simulados en el estudio vs. Caudales medidos de otras fuentes.



Fuente: Elaboración propia.

El modelo WEAP para la cuenca de Sella Quebrada ofrece una representación confiable de los caudales medios mensuales, captando con precisión los patrones estacionales observados en estudios previos. Este estudio ha integrado una mayor cantidad de datos de caudales observados, lo que fortalece la calibración y da mayor representatividad a las simulaciones.

En el contexto de gestión hídrica y operación de infraestructura como presas, es favorable que el modelo subestime ligeramente los caudales en algunos meses, ya que esto proporciona un margen de seguridad importante para el diseño y mitigación de riesgos de inundación. Esta característica hace que el modelo sea especialmente útil para escenarios de planificación y manejo prudente de recursos.

En conclusión, el modelo WEAP utilizado en el presente estudio constituye una herramienta robusta y válida para la toma de decisiones en la cuenca alta del Guadalquivir,

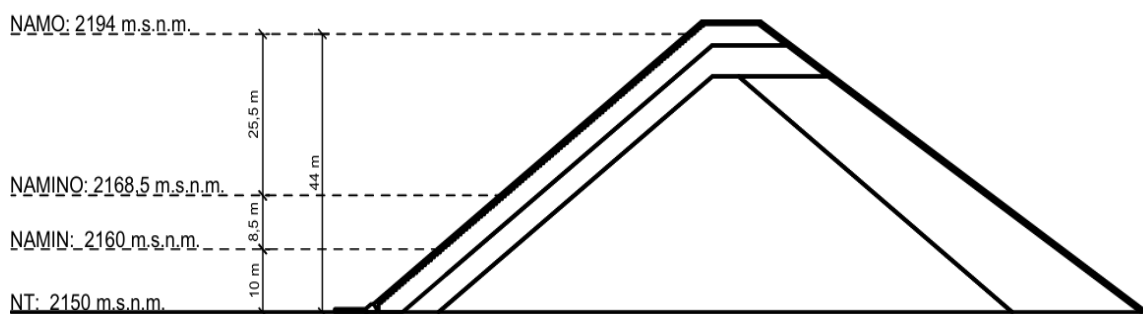
proporcionando una base sólida para la gestión hídrica y cumpliendo con los estándares necesarios para estudios hidrológicos de esta naturaleza.

4.3. Regulación del embalse “Sella Rumicancha” para diferentes escenarios de oferta hídrica.

4.3.1. Niveles y volúmenes característicos de la presa asumidos para la regulación.

Los niveles y volúmenes usados para la regulación, serán los proporcionados por SEDEGIA (ver tabla 3.3 y 3.4), ya que estos suponen las dimensionas actuales (construido).

Figura 4.21. Esquema de niveles de la presa “Sella – Rumicancha”.



Fuente: Elaboración propia con apoyo de SEDEGIA.

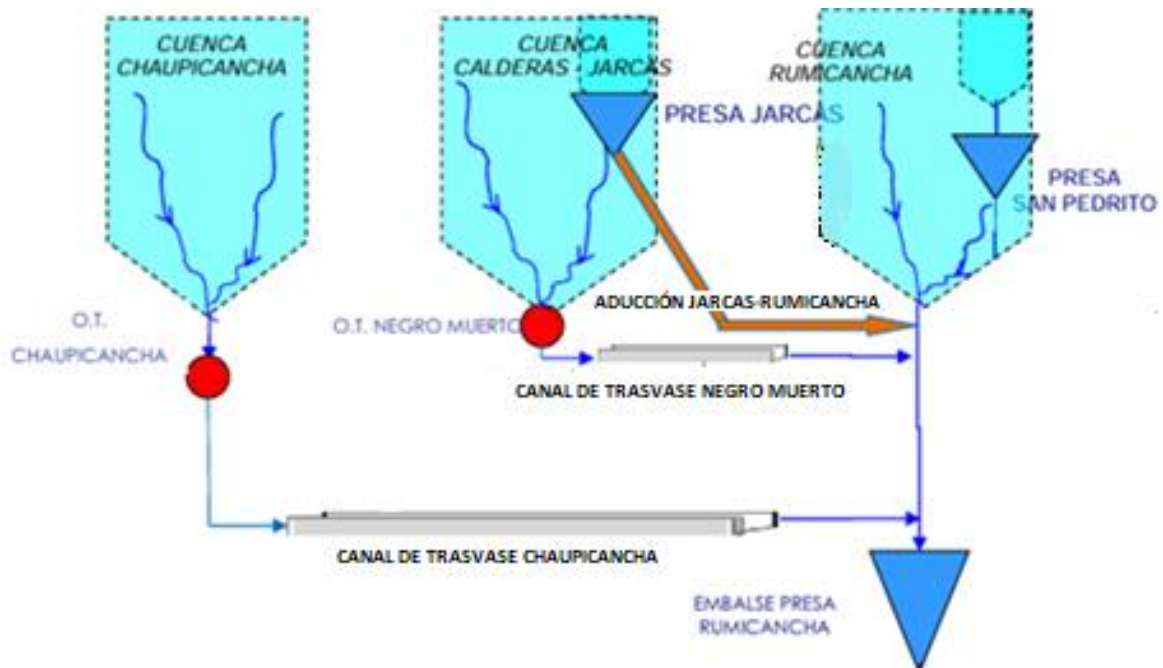
Sin embargo, para una mejor operación y eficiencia del embalse, el volumen útil será a partir del nivel de aguas mínima (NAMIN), operando así con las tuberías de desfogue de fondo. Esta conclusión se llega a base de consultas con especialistas de SEDEGIA. Esto supone la mejor alternativa, ya que por características de la obra de toma (tipo torre), se tendría un volumen inutilizable de la cota 2160 a 2168,5 m.s.n.m.

Dicho esto, la altura útil asumida para la regulación es de 34 m y un volumen útil de 10 095 032,68 m³.

4.3.2. Oferta hídrica del embalse.

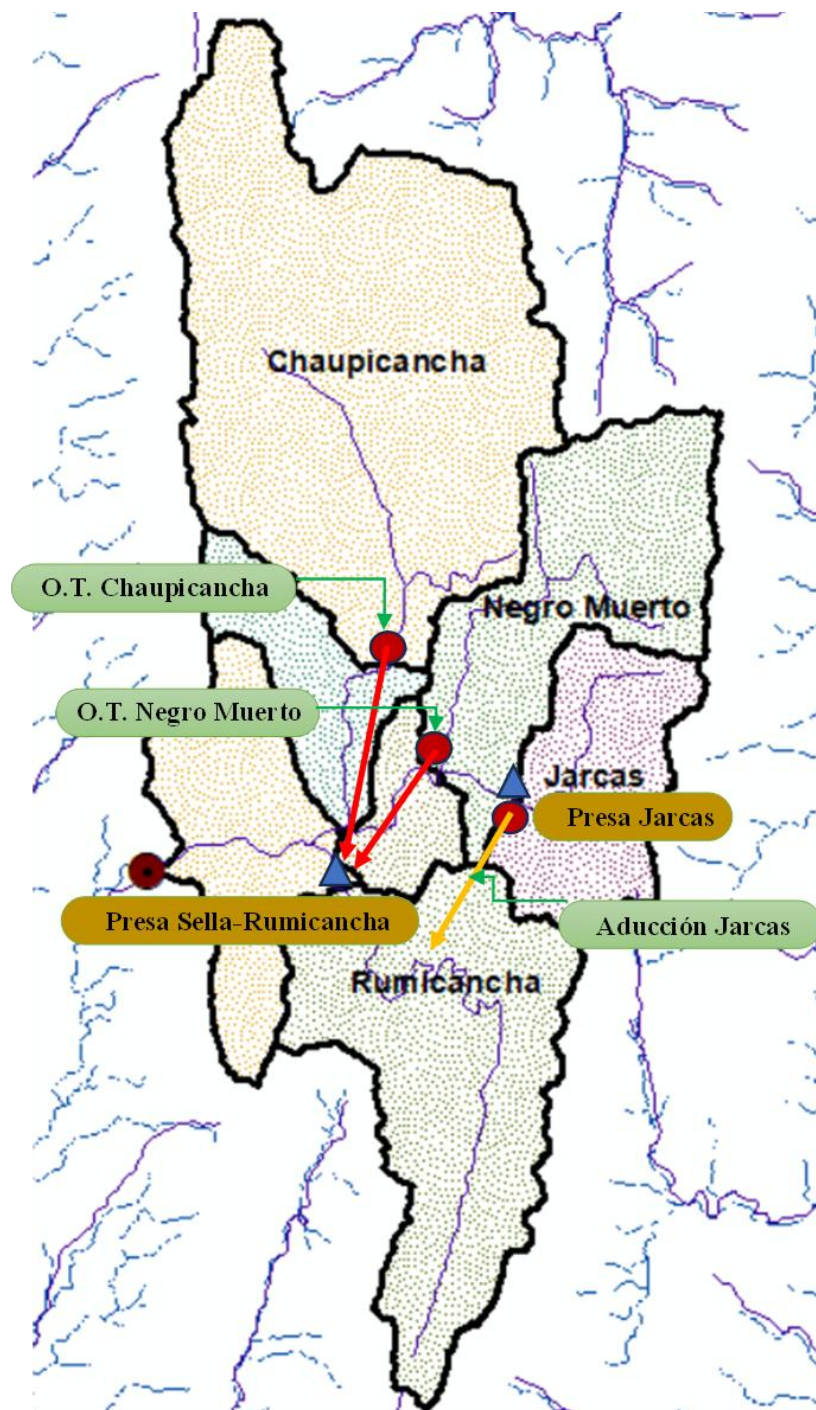
Como se mencionó anteriormente, el embalse “Sella - Rumicancha”, tiene proyectado la construcción de dos trasvases y un sistema de aducción, que ayudaran a que el embalse alcance su máxima capacidad, según el estudio TESA.

Figura 4.22. Esquema general describiendo las entradas hacia el embalse “Sella – Rumicancha”.



Fuente: Elaboración Propia a base del estudio TESA.

Figura 4.23. Esquema de entradas al embalse superpuesto sobre las cuencas de estudio.

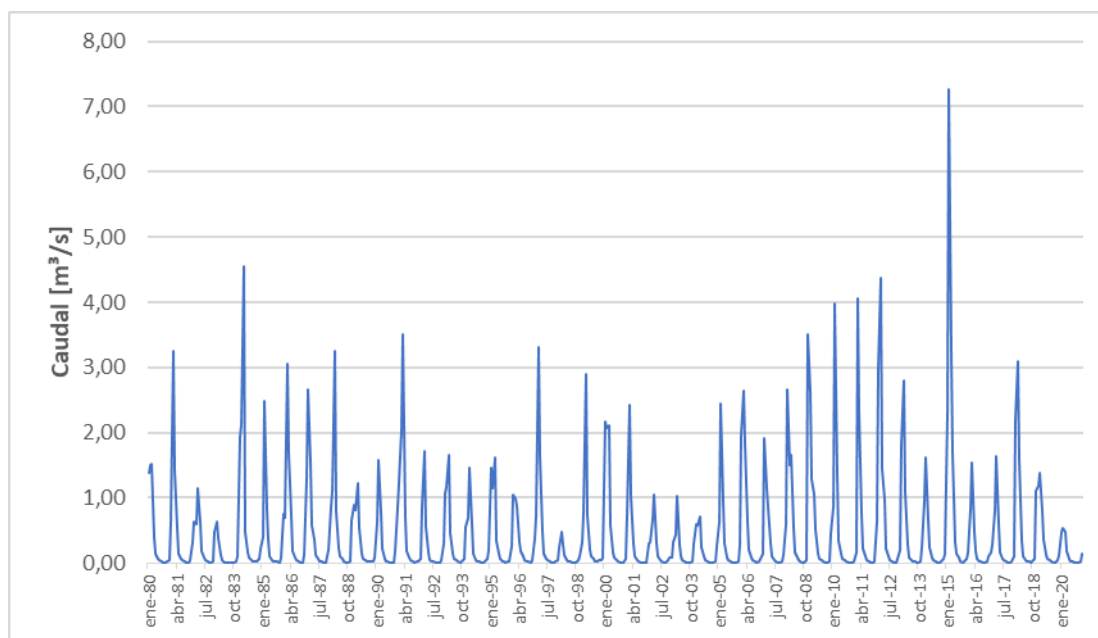


Fuente: Elaboración Propia.

Los caudales usados serán los generados (simulados) con el modelo WEAP, que se describió anteriormente. Su único propósito es estimar los caudales medios mensuales que componen la parte de la oferta del embalse.

Los caudales simulados usados corresponden al periodo 1980 – 2020, que generan 40 años de datos. Se destaca el amplio periodo de datos, los cuales ofrecen mayor seguridad en la oferta, teniendo en cuenta la envergadura que conlleva la construcción y operación de un embalse de almacenamiento, en la siguiente grafica se detalle los caudales mensuales generados para el presente estudio, de toda la cuenca Sella quebrada.

Figura 4.24. Caudales mensuales (1980 – 2020) modelados para la cuenca Sella Quebrada.



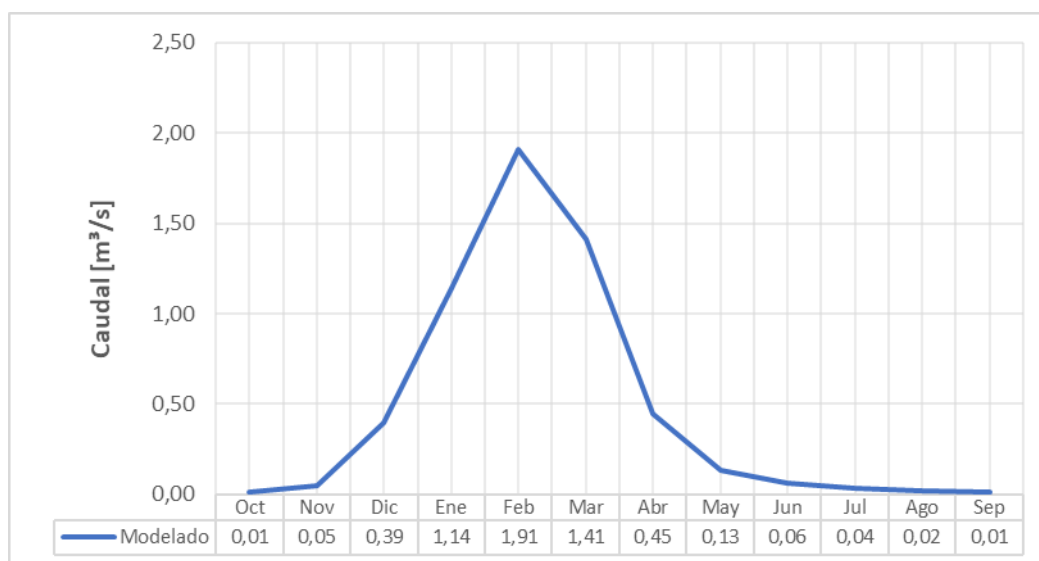
Fuente: Elaboración propia.

La gráfica 4.23. muestra un régimen hídrico estacional en la cuenca, con mayores caudales en la temporada de lluvias y caudales bajos constantes en la temporada seca. Esta estacionalidad sugiere que el embalse "Sella - Rumicancha" podrá aprovechar el exceso de caudal en los meses húmedos para regular el suministro en los meses secos, facilitando la planificación de una operación eficiente mediante un patrón claro de acumulación y liberación.

En general, los caudales simulados por el modelo "SellaQuebrada_1" en la cuenca Sella Quebrada, muestran una oferta hídrica estacional y variable, pero predecible. Esta variabilidad es manejable y favorable para la regulación del embalse "Sella - Rumicancha", dado que permite el almacenamiento de los caudales altos en la temporada de lluvias y asegura una disponibilidad básica en la temporada seca. La oferta hídrica simulada es

suficiente para respaldar un diseño de regulación que mantenga un flujo controlado y sostenible en el tiempo. Este mismo comportamiento presentan los caudales mensuales y medios mensuales de cada unidad hidrológica.

Figura 4.25. Caudales medios mensuales simulados para la cuenca Sella Quebrada.



Fuente: Elaboración propia.

Los caudales de aporte estarán ajustados a las “Guías para la elaboración de estudios de diseño técnico de reinversión para proyectos de riego (menores, medianos y mayores)” elaborado por el Ministerio de Medio Ambiente y Agua y el Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego (2018); el cual menciona lo siguiente:

En casos en que los datos de precipitación y/o hidrométricos sean escasos, se podrán efectuar cálculos de los volúmenes mensuales aprovechables de los escurrimientos de la cuenca, en base a los caudales mensuales con persistencias del 75%, los mismos que podrán ser obtenidos mediante modelos determinísticos en base a información cartográfica del clima, suelos y cobertura vegetal.

La persistencia del caudal en los diferentes escenarios también es un aspecto clave a considerar. El análisis de los caudales para un año seco (75% de persistencia) indica que la oferta hídrica sería limitada, lo cual podría generar desafíos en la gestión del embalse durante los periodos de sequía. Por otro lado, los caudales del año húmedo (25% de persistencia) permiten evaluar la capacidad del embalse para manejar periodos de mayor flujo.

Por lo tanto, los caudales medios mensuales de aporte, utilizado para la regulación, serán al 75% de persistencia, los cuales simulan un año seco.

4.3.2.1. Aportación propia.

Los caudales medios mensuales de la cuenca Rumicancha (propia del embalse), fueron simulados con el modelo WEAP “SellaQuebrada_1” que corresponden a las unidades hidrológicas: UH_Rumicancha y UH_SanPedrito.

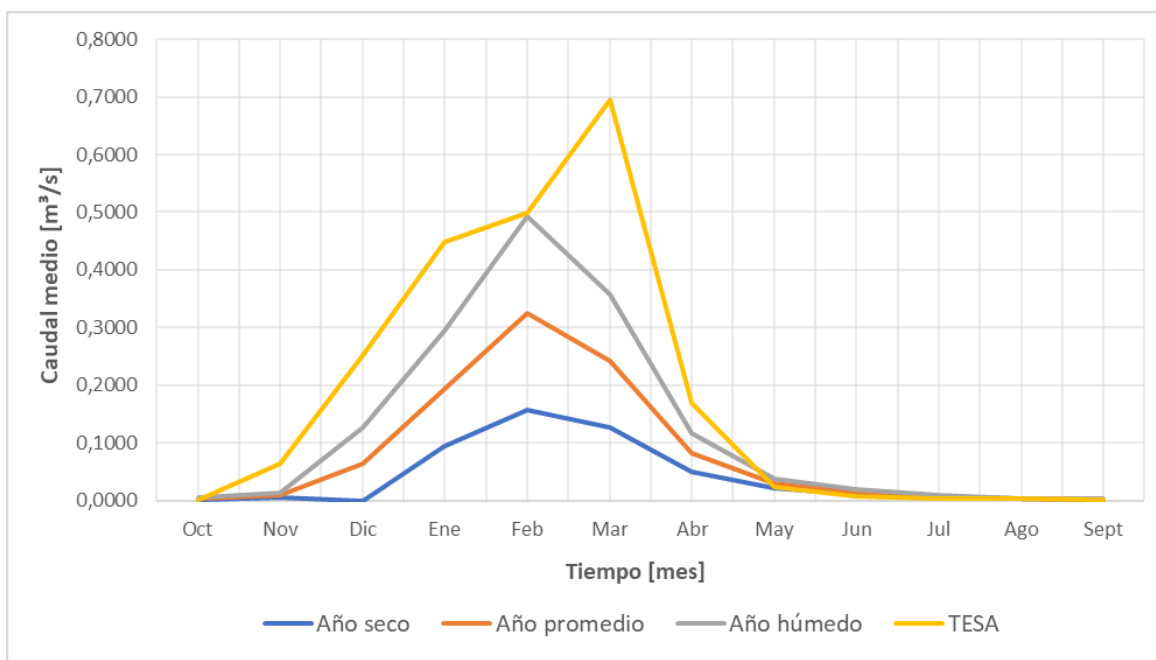
Los caudales simulados por el modelo corresponden al año promedio, a continuación, se detallan los caudales medios mensuales para año seco (75% de persistencia) y año húmedo (25% de persistencia).

Tabla 4.11. Caudales medios mensuales para año seco, promedio y húmedo – Sub cuenca Rumicancha.

Caudal medio [m³/s]				
ÁREA [km²]	31,47			28,94
Descripción:	Año seco	Año promedio	Año húmedo	TESA
Oct	0,0021	0,0033	0,0045	0,0019
Nov	0,0059	0,0094	0,0129	0,0631
Dic	0,0003	0,0632	0,1260	0,2525
Ene	0,0949	0,1943	0,2938	0,4476
Feb	0,1564	0,3244	0,4925	0,4993
Mar	0,1275	0,2423	0,3572	0,6944
Abr	0,0496	0,0832	0,1169	0,1703
May	0,0224	0,0306	0,0387	0,0230
Jun	0,0111	0,0149	0,0187	0,0077
Jul	0,0053	0,0069	0,0086	0,0038
Ago	0,0028	0,0035	0,0042	0,0038
Sept	0,0019	0,0023	0,0027	0,0019
Volumen [m³]	1 239 022,52	2 526 780,23	3 814 537,94	5 659 762,63

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.26. Hidrograma de caudales medios mensuales sub cuenca Rumicancha vs. Caudales estimados por el estudio TESA.



Fuente: Elaboración propia.

4.3.2.2. Determinación de los caudales de trasvase y aducción.

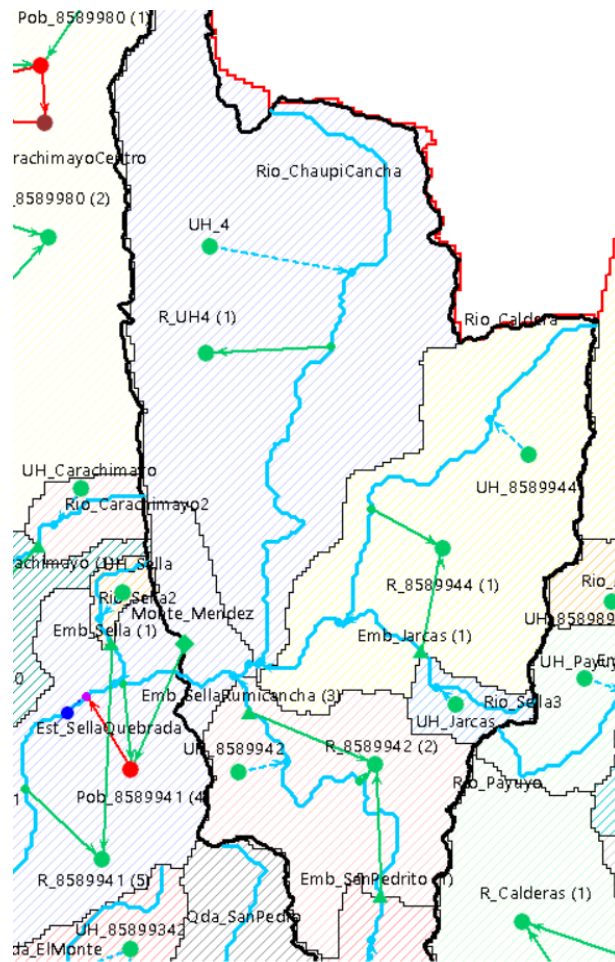
Los caudales de trasvase derivados de las obras de toma Chaupicancha y Negro Muerto, serán los de los meses con mayor oferta (enero, febrero y marzo). A falta de una norma sobre la determinación del caudal ecológico y de derecho a terceros, se procede a analizar los siguientes criterios para estimar el valor de estos:

- Los caudales derivados de las obras de toma Chaupicancha y Negro Muerto se concentrarán en los meses de mayor oferta hídrica, que corresponden a enero, febrero y marzo. Estos meses presentan el mayor caudal debido a la temporada de lluvias, permitiendo un mayor volumen de trasvase sin comprometer el flujo necesario para el mantenimiento ecológico.
- Para el caudal ecológico, un criterio posible es asignar un porcentaje del caudal medio mensual en el río como caudal ecológico. Generalmente, este valor en Bolivia, se toma el 10% del caudal medio, dependiendo de las características del ecosistema y la biodiversidad local. Este criterio busca asegurar que el ecosistema conserve sus funciones y servicios fundamentales.

- En el caso del caudal de derechos a terceros, dado que en la parte alta de la cuenca no hay una demanda significativa de grandes usuarios consuntivos, la estimación del caudal de derecho a terceros se basará en los usos locales menores. Se puede considerar el uso tradicional y las prácticas de consumo de pequeñas comunidades o actividades agrícolas de subsistencia que requieran un flujo mínimo de agua.

Del modelo “Guadalquivir_3”, se observa que existen demandas aguas abajo de la cuenca Sella Quebrada, que corresponden a áreas de riego y consumo de agua potable: R_8589941 y Pob_8589941.

Figura 4.27. Esquema de la cuenca de estudio en el modelo WEAP “Guadalquivir_3”.



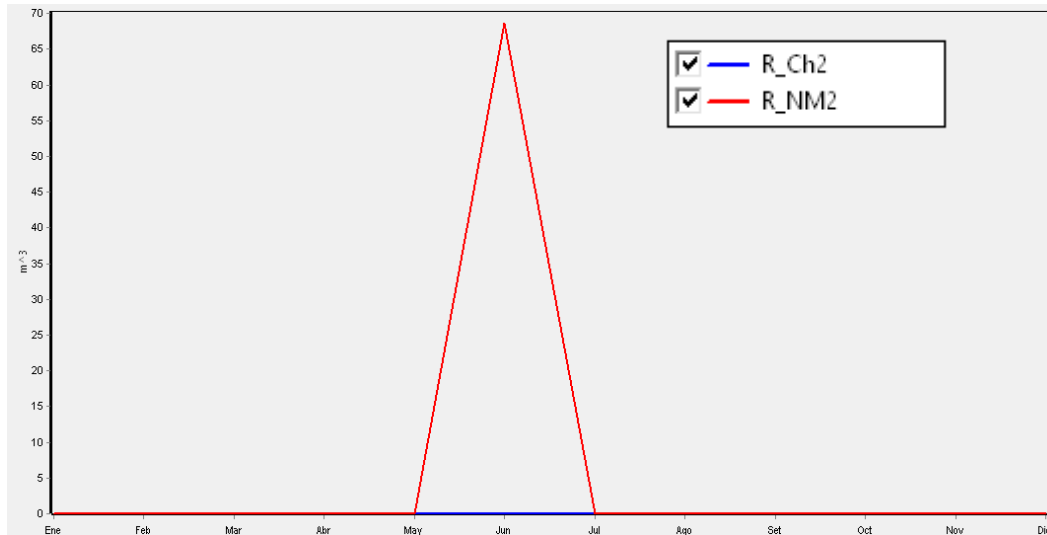
Fuente: Modelo WEAP “Guadalquivir_3”.

Las demandas de riego aguas abajo no se tomarán en cuenta para estimar el caudal de derecho a terceros, ya que con la funcionalidad del embalse “Sella – Rumicancha” se espera cubrir estas demandas; la demanda de agua potable también se descarta, debido que no es una

Por tanto, para la estimación del caudal de derecho a terceros, se estimará a base de las demandas de riego aguas abajo de las obras de toma: R_Ch2 y R_NM2; la demanda por “R_Rest” se espera que sea cubierta por el embalse.

Las demandas estimadas son las demandas no cubiertas por la precipitación.

Figura 4.29. Demandas no cubiertas por las unidades de riego: R_Ch2 y R_NM2



Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en el gráfico 4.28., no existen demandas no cubiertas en los meses de enero, febrero y marzo.

Sin embargo, se decidió asignar como caudal de derecho a terceros el 10% del caudal medio mensual; es una decisión adecuada considerando las condiciones de oferta hídrica de la cuenca alta de Rumicanha, la ausencia de demandas significativas no cubiertas durante los meses de enero, febrero y marzo, y la capacidad del embalse para cubrir las demandas aguas abajo. Además, esta asignación asegura que se mantenga un caudal suficiente para cubrir los usos locales y las necesidades tradicionales sin comprometer la funcionalidad del embalse, apoyando un manejo sostenible del recurso hídrico en la cuenca alta del Guadalquivir. Por tanto, se dejará un 20% en total como caudal ecológico y derecho a terceros.

Para lograr la máxima eficiencia en la operación del embalse, los caudales de trasvase y aducción se definirán en función de la máxima oferta mensual disponible para cada mes en un año seco. Esta estrategia asegura que, incluso en condiciones de baja disponibilidad hídrica, el embalse pueda operar de manera óptima, aprovechando el recurso de forma constante y minimizando el riesgo de escasez durante los meses críticos. Al utilizar los valores máximos mensuales en un año seco, se garantiza una gestión conservadora y sostenible del embalse, manteniendo reservas suficientes para cubrir las demandas prioritarias y asegurar un flujo regulado. Esta metodología también contribuye a la

planificación de recursos en años con variabilidad climática, permitiendo que el embalse responda adecuadamente a las fluctuaciones estacionales de caudal.

4.3.2.2.1. Oferta: sub cuenca Chaupicancha.

Los caudales medios mensuales de la subcuenca Chaupicancha (trasvase), fueron simulados con el modelo WEAP “SellaQuebrada_1” que corresponden a la unidad hidrológica: UH_Chaupicancha.

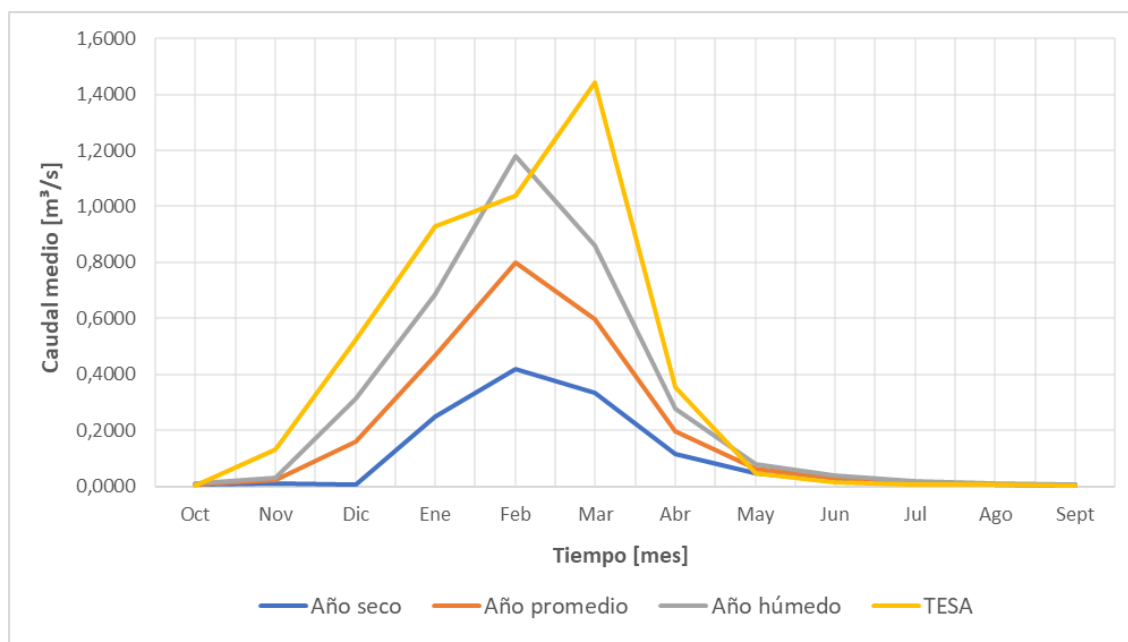
De estos caudales se determinará el caudal para el trasvase y aporte al embalse “Sella – Rumicancha”, más adelante se detallará la determinación de la oferta.

Tabla 4.12. Caudales medios mensuales para año seco, promedio y húmedo – Sub cuenca Chaupicancha.

Caudal medio [m³/s]				
ÁREA [km²]	58,65			60,18
Descripción:	Año seco	Año promedio	Año húmedo	TESA
Oct	0,0048	0,0071	0,0094	0,0040
Nov	0,0113	0,0220	0,0326	0,1313
Dic	0,0085	0,1612	0,3138	0,5251
Ene	0,2476	0,4661	0,6846	0,9308
Feb	0,4200	0,8010	1,1820	1,0382
Mar	0,3353	0,5969	0,8585	1,4440
Abr	0,1147	0,1956	0,2765	0,3540
May	0,0459	0,0630	0,0802	0,0477
Jun	0,0216	0,0296	0,0376	0,0159
Jul	0,0127	0,0163	0,0198	0,0080
Ago	0,0066	0,0082	0,0097	0,0080
Sept	0,0044	0,0054	0,0064	0,0040
Volumen [m³]	3 182 134,65	6 124 711,65	9 067 288,66	11 769 333,62

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.30. Hidrograma de caudales medios mensuales sub cuenca Chaupicancha vs. Caudales estimados por el estudio TESA.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.13. Caudal de trasvase, oferta: sub cuenca Chaupicancha.

	Caudal medio [l/s]	Caudal medio 80% [l/s]	Caudal trasvase [l/s]	Volumen [m³]
Oct	4,84	3,87		
Nov	11,33	9,07		
Dic	8,50	6,80		
Ene	247,65	198,12	195,00	522 288,00
Feb	420,02	336,02	335,00	810 432,00
Mar	335,30	268,24	265,00	709 776,00
Abr	114,65	91,72		
May	45,93	36,75		
Jun	21,61	17,29		
Jul	12,71	10,17		
Ago	6,61	5,29		
Sept	4,45	3,56		
Suma	1 233,63	986,90	795,00	2 042 496,00

Fuente: Elaboración propia.

4.3.2.2.2. Oferta: sub cuenca Negro Muerto.

Los caudales medios mensuales de la subcuenca Negro Muerto (trasvase), fueron simulados con el modelo WEAP “SellaQuebrada_1” que corresponden a la unidad hidrológica: UH_NegroMuerto.

De estos caudales se determinará el caudal para el trasvase y aporte al embalse “Sella – Rumicancha”, más adelante se detallará la determinación de la oferta.

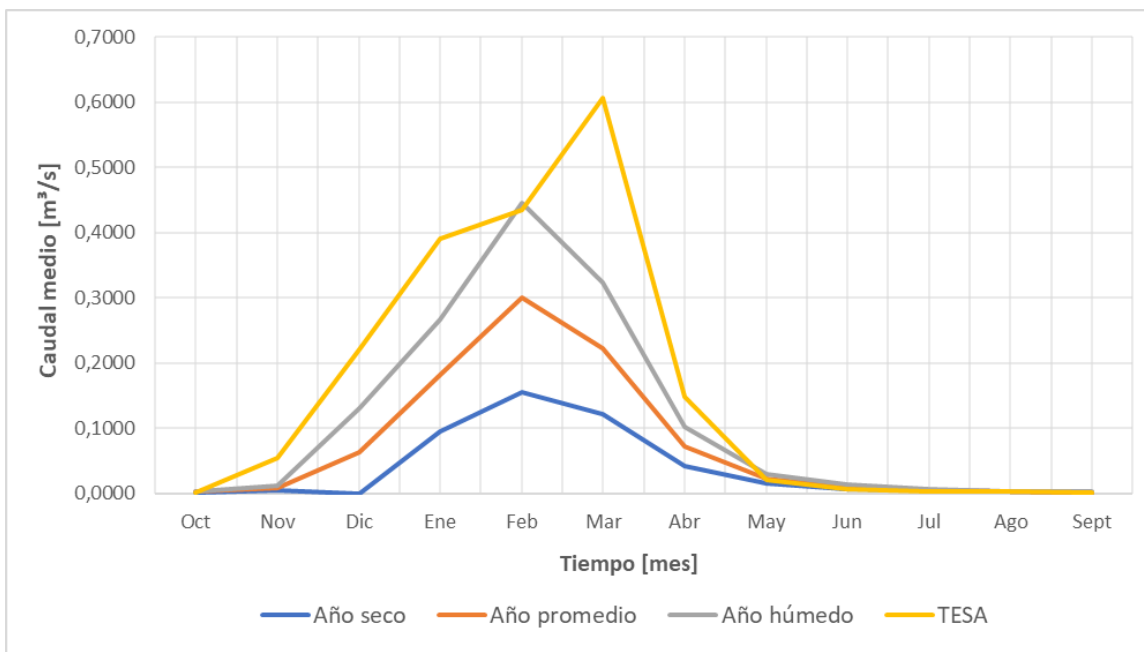
El caudal del mes de diciembre presento déficit con 75% de persistencia, se rellenó el dato con cero.

Tabla 4.14. Caudales medios mensuales para año seco, promedio y húmedo – Sub cuenca Negro Muerto.

Caudal medio [m³/s]				
ÁREA [km²]	23,91			25,25
Descripción:	Año seco	Año promedio	Año húmedo	TESA
Oct	0,0017	0,0027	0,0036	0,0017
Nov	0,0044	0,0085	0,0125	0,0551
Dic	0,0000	0,0635	0,1300	0,2203
Ene	0,0957	0,1812	0,2668	0,3906
Feb	0,1547	0,3002	0,4457	0,4356
Mar	0,1211	0,2220	0,3229	0,6059
Abr	0,0424	0,0724	0,1024	0,1485
May	0,0161	0,0227	0,0293	0,0200
Jun	0,0071	0,0101	0,0130	0,0067
Jul	0,0042	0,0055	0,0067	0,0033
Ago	0,0022	0,0027	0,0032	0,0033
Sept	0,0015	0,0018	0,0022	0,0017
Volumen [m³]	1 163 565,46	2 306 524,35	3 457 564,23	4 938 113,56

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.31. Hidrograma de caudales medios mensuales sub cuenca Negro Muerto vs. Caudales estimados por el estudio TESA.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.15. Caudal de trasvase, oferta: sub cuenca Negro Muerto.

	Caudal medio [l/s]	Caudal medio 80% [l/s]	Caudal trasvase [l/s]	Volumen [m³]
Oct	1,72	1,38		
Nov	4,43	3,54		
Dic	0,00	0,00		
Ene	95,67	76,53	75,00	200 880,00
Feb	154,72	123,78	120,00	290 304,00
Mar	121,06	96,84	95,00	254 448,00
Abr	42,45	33,96		
May	16,10	12,88		
Jun	7,14	5,71		
Jul	4,22	3,38		
Ago	2,18	1,74		
Sept	1,51	1,21		
Suma	451,19	360,95	290,00	745 632,00

Fuente: Elaboración propia.

4.3.2.2.3. Oferta: sub cuenca Jarcas.

Los caudales medios mensuales de la subcuenca Jarcas (Aducción), fueron simulados con el modelo WEAP “SellaQuebrada_1” que corresponden a la unidad hidrológica: UH_Jarcas.

De estos caudales se determinará el caudal para la aducción y aporte al embalse “Sella – Rumicancha”, más adelante se detallará la determinación de la oferta.

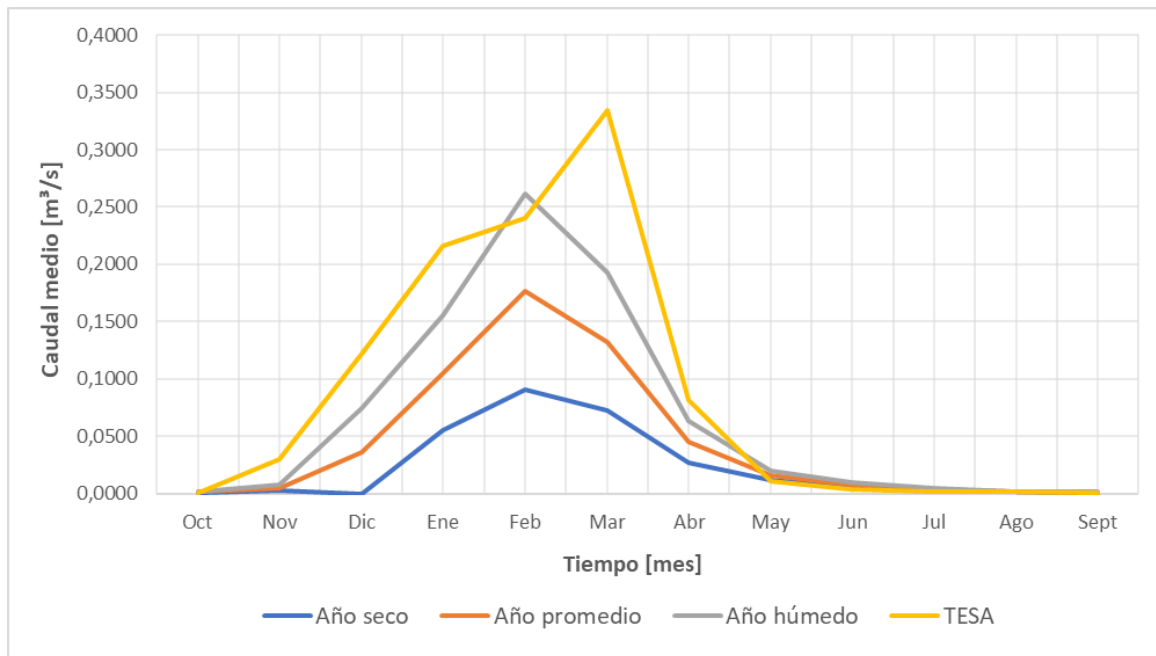
El caudal del mes de diciembre presento déficit con 75% de persistencia, se rellenó el dato con cero.

Tabla 4.16. Caudales medios mensuales para año seco, promedio y húmedo – Sub cuenca Jarcas.

Caudal medio [m³/s]				
ÁREA [km²]	14,25			13,95
Descripción:	Año seco	Año promedio	Año húmedo	TESA
Oct	0,0011	0,0016	0,0022	0,0009
Nov	0,0027	0,0050	0,0073	0,0304
Dic	0,0000	0,0364	0,0745	0,1217
Ene	0,0553	0,1051	0,1550	0,2158
Feb	0,0911	0,1766	0,2621	0,2407
Mar	0,0726	0,1326	0,1925	0,3347
Abr	0,0273	0,0453	0,0633	0,0821
May	0,0118	0,0159	0,0199	0,0111
Jun	0,0058	0,0077	0,0095	0,0037
Jul	0,0028	0,0036	0,0044	0,0018
Ago	0,0014	0,0018	0,0021	0,0018
Sept	0,0010	0,0012	0,0014	0,0005
Volumen [m³]	704 251,38	1 376 009,73	2 052 262,27	2 727 001,61

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.32. Hidrograma de caudales medios mensuales sub cuenca Jarcas vs. Caudales estimados por el estudio TESA.



Fuente: Elaboración propia.

El caudal de aducción que aportará al embalse “Sella – Rumicancha”, al provenir de un depósito artificial (embalse Jarcas), puede disponerse en los meses más requeridos, en este caso se mantendrá en los meses asumidos por el estudio TESA: septiembre y octubre (luego de un proceso de iteración de la regulación del embalse, se determinó que esta es la mejor alternativa).

A falta de información, para determinar el caudal, se sacará proporcionalmente de la relación entre oferta hídrica de la subcuenca Jarcas y la demanda, siendo:

- Aporte anual (TESA): 2 727 001,61 m³.
- Volumen de aducción (TESA): 969 449,92 m³.

El volumen de aducción representa el 35,55% de la oferta anual, esta relación se mantendrá para estimar la demanda en el presente estudio.

- Aporte anual (Subcuenca Jarcas): 704 251,38 m³ (año seco).
- Volumen de aducción: 250 361,36 m³.

Este volumen representa 47,50 l/s en cada mes, se asumirá como caudal de aducción 50 l/s siendo un volumen total de 263 520,00 m³, que representa el 37% del aporte anual de la subcuenca Jarcas.

Tabla 4.17. Caudal de aducción, oferta: sub cuenca Jarcas.

	Caudal medio [l/s]	Caudal aducción [l/s]	Volumen [m ³]
Oct	1,09	50,00	133 920,00
Nov	2,69		
Dic	0,00		
Ene	55,28		
Feb	91,09		
Mar	72,63		
Abr	27,30		
May	11,85		
Jun	5,83		
Jul	2,76		
Ago	1,43		
Sept	0,98	50,00	129 600,00
Suma	272,94	100,00	263 520,00

Fuente: Elaboración propia.

4.3.2.2.4. Oferta: sub cuenca Jarcas y Negro Muerto.

También se estimará los caudales medios mensuales de las subcuencas Negro Muerto y Jarcas, para analizar un posible escenario de regulación con las dos áreas de aporte, las unidades hidrológicas que componen estas subcuencas dentro del modelo WEAP son: UH_NegroMuerto y UH_Jarcas.

De estos caudales se determinará el caudal de oferta para el trasvase y aporte al embalse “Sella – Rumicancha”, más adelante se detallará la determinación de la oferta.

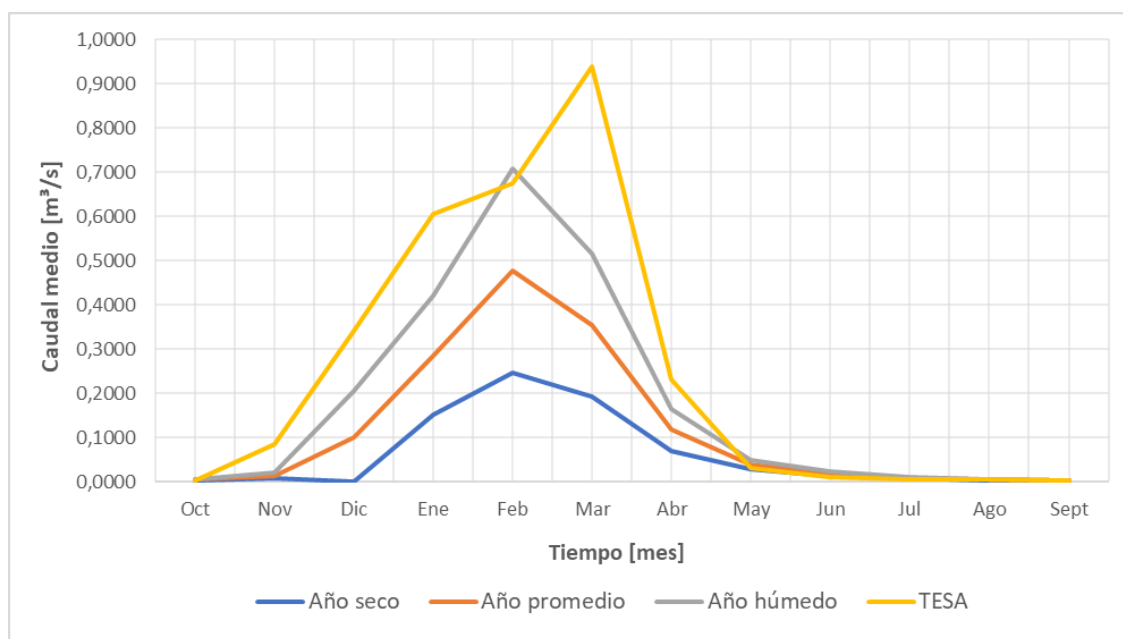
El caudal del mes de diciembre presento déficit con 75% de persistencia, se rellenó el dato con cero.

Tabla 4.18. Caudales medios mensuales para año seco, promedio y húmedo – Sub cuenca Negro Muerto y Jarcas.

Caudal medio [m³/s]				
ÁREA [km²]	38,16			39,2
Descripción:	Año seco	Año promedio	Año húmedo	TESA
Oct	0,0028	0,0043	0,0058	0,0026
Nov	0,0071	0,0135	0,0199	0,0855
Dic	0,0000	0,0999	0,2045	0,3420
Ene	0,1510	0,2863	0,4217	0,6063
Feb	0,2458	0,4768	0,7078	0,6763
Mar	0,1937	0,3545	0,5154	0,9406
Abr	0,0698	0,1177	0,1656	0,2306
May	0,0279	0,0386	0,0492	0,0311
Jun	0,0130	0,0177	0,0225	0,0104
Jul	0,0070	0,0090	0,0111	0,0052
Ago	0,0036	0,0045	0,0054	0,0052
Sept	0,0025	0,0030	0,0036	0,0021
Volumen [m³]	1 867 883,23	3 682 534,01	5 509 758,93	7 665 115,17

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.33. Hidrograma de caudales medios mensuales sub cuencas Negro Muerto y Jarcas vs. Caudales estimados por el estudio TESA.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.19. Caudal de trasvase, oferta: sub cuenca Negro Muerto y Jarcas.

	Caudal medio [l/s]	Caudal medio 80% [l/s]	Caudal trasvase [l/s]	Volumen [m³]
Oct	2,81	2,25		
Nov	7,13	5,70		
Dic	0,00	0,00		
Ene	150,96	120,77	120,00	321 408,00
Feb	245,82	196,66	195,00	471 744,00
Mar	193,69	154,95	150,00	401 760,00
Abr	69,75	55,80		
May	27,94	22,35		
Jun	12,97	10,38		
Jul	6,98	5,58		
Ago	3,61	2,89		
Sept	2,50	2,00		
Suma	724,16	579,32	465,00	1 194 912,00

Fuente: Elaboración propia.

4.3.3. Pérdidas del embalse.

4.3.3.1. Pérdidas por evaporación.

La estimación de la evaporación se llevó a cabo utilizando un evaporímetro ubicado en la estación Sella Quebrada, que se encuentra relativamente cerca del embalse (a aproximadamente 1,5 km). Esta proximidad es crucial en una región con alta variabilidad espacial en las condiciones climáticas, como lo es la cuenca alta del Guadalquivir, ya que permite que los datos recolectados reflejen, en gran medida, las condiciones climáticas prevalecientes en el embalse. La cercanía garantiza que las variables meteorológicas como la temperatura, humedad relativa y velocidad del viento sean comparables entre la estación y el área del embalse, lo cual es importante para lograr una estimación aceptable de la evaporación. El periodo de datos usados de la estación, corresponden a los años 1991 – 2023.

Los datos del evaporímetro fueron multiplicados por un factor de 0,7 para reflejar de manera más precisa la evaporación real del embalse. Este factor se utiliza para ajustar la evaporación registrada por el evaporímetro tipo tanque, que generalmente es mayor a la evaporación de un cuerpo de agua grande como un embalse.

Tabla 4.20. Pérdidas por evaporación del embalse “Sella – Rumicancha”.

Mes:	Evaporación media [mm/día]	Evaporación media [mm/día] *0,7	Evaporación [mm/mes]
Junio	3,29	2,30	69,15
Julio	3,43	2,40	74,45
Agosto	4,24	2,96	91,91
Septiembre	5,04	3,52	105,75
Octubre	5,59	3,92	121,38
Noviembre	5,60	3,92	117,56
Diciembre	5,60	3,92	121,42
Enero	5,38	3,77	116,74
Febrero	4,97	3,48	97,50
Marzo	4,50	3,15	97,67
Abril	4,04	2,83	84,89
Mayo	3,49	2,44	75,73

Fuente: Elaboración propia.

Para convertir la pérdida por evaporación en volumen de agua, se multiplicó la tasa de evaporación mensual por el área superficial correspondiente al volumen máximo de almacenamiento del embalse (basado en los caudales medios mensuales). Esta metodología permite estimar la cantidad de agua evaporada teniendo en cuenta que, a medida que el nivel mensual del embalse varía, el área expuesta a la evaporación también cambia. Aunque esta aproximación puede simplificar la realidad dinámica de los embalses, proporciona una estimación razonable del volumen de agua perdido, especialmente cuando se busca obtener un valor promedio para el análisis de regulación del embalse.

4.3.3.2. Pérdidas por filtración.

Se utilizó el mapa de suelos de ZONISIG para la cuenca alta del Guadalquivir, identificando que el suelo predominante es Leptosol, caracterizado por arcillas expansivas y alta plasticidad.

Con base en la acumulación de materiales en el fondo del embalse, se consideraron los suelos CL (arcilla de baja plasticidad), ML (limo), CH (arcilla de alta plasticidad) y MH (limo altamente plástico) como representativos de la permeabilidad del fondo del embalse. En la siguiente tabla se detalla los valores de permeabilidad.

Tabla 4.21. Valores de permeabilidad para diferentes tipos de suelos.

Clasificación suelos	Permeabilidad K [lit/seg-ha]		Promedio [lit/seg-ha]	Permeabilidad [mm/día]
	maximo	minimo		
GW	2610	1256	1933	167011,2
GP	6186	3286	4736	409190,4
GM		0,029		2,5056
GC		0,029		2,5056
SW	*			
SP		1,45		125,28
SM	0,725	0,464	0,5945	51,3648
SM-SC	0,077	0,058	0,0675	5,832
SC	0,029	0,019	0,024	2,0736
ML	0,057	0,022	0,0395	3,4128
ML-CL	0,013	0,007	0,01	0,864
CL	0,008	0,003	0,0055	0,4752
OL	*			
MH	0,015	0,01	0,0125	1,08
CH	0,005	0,005	0,005	0,432
OH	*			

* Denota datos insuficientes

Fuente: Elaboración propia con apoyo de Bureau of Reclamation (2007).

Con el tiempo el material en el fondo del vaso se va a componer por materiales finos como ser limos y arcillas. Además, según el mapa de tipo de suelo de ZONISIG, el material predominante en la cuenca es arcilla, este material se depositará en el vaso, por tanto, se tomará un valor de filtración promedio compuesto por los siguientes suelos: ML, ML-CL, CL, MH y CH; el cual arroja un valor aproximado de 1,25 mm/día.

Tabla 4.22. Perdidas por filtración del embalse “Sella – Rumicancha”.

Mes:	Filtración [mm/día]	Filtración [mm/mes]
Junio	1,50	45,00
Julio	1,50	46,50
Agosto	1,50	46,50
Septiembre	1,50	45,00
Octubre	1,50	46,50
Noviembre	1,50	45,00
Diciembre	1,50	46,50
Enero	1,50	46,50
Febrero	1,50	42,00
Marzo	1,50	46,50
Abril	1,50	45,00
Mayo	1,50	46,50

Fuente: Elaboración propia.

Para convertir la pérdida por filtración a un volumen de agua, se multiplicó la tasa de filtración por el área superficial correspondiente al volumen máximo de almacenamiento del embalse, calculado a partir de los caudales medios mensuales. Esta metodología se justifica porque la pérdida por filtración depende directamente de la superficie de contacto entre el agua y el fondo del embalse. Al utilizar el área máxima de oferta, se obtiene una estimación conservadora, garantizando que las pérdidas estimadas representen un escenario de máxima exposición al proceso de filtración. Aunque esta aproximación puede no reflejar con precisión las variaciones estacionales del nivel del agua, proporciona un valor razonable y práctico para ser utilizado en el análisis de regulación del embalse, asegurando una planificación adecuada y cautelosa.

4.3.4. Demandas del embalse.

Las demandas a considerar en la regulación, serán 2:

- Demanda de riego: la cual será extraída directamente del estudio TESA.
- Caudal ecológico.

En la regulación del embalse "Sella - Rumicancha", no se considerará el caudal de derecho a terceros como demanda debido a las siguientes razones:

- La cuenca de Rumicancha se encuentra en la parte alta del sistema del Guadalquivir, donde la función principal es la recolección y regulación del recurso hídrico para las áreas aguas abajo. En esta zona, no existen grandes demandas consuntivas que deban ser atendidas directamente.
- El objetivo principal de la regulación del embalse es garantizar la acumulación y disponibilidad de agua para su uso aguas abajo. Considerar demandas de derecho a terceros en la cuenca alta podría disminuir la eficiencia en la regulación y la capacidad de acumulación del embalse, comprometiendo el objetivo de mantener un suministro continuo y seguro.

4.3.4.1. Demanda de riego.

La cédula adoptada por el estudio TESA, está compuesto por: Maíz grano, maíz choclo, papa miski o temprana, papa tardía o de verano, arveja en verde, hortalizas menores, alfalfa como forraje, y frutales principalmente como la vid, durazno y manzano.

Tabla 4.23. Cedula de cultivos propuestos por el estudio TESA.

Nº	Cultivo (Has)	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	Total
1	Maíz grano						500	500	500	500	500	500		500
2	Maíz choclo			150	150	150	150	150						150
3	Papa temprana			350	350	350	350							350
4	Papa tardía							400	400	400	400	400	400	400
5	Arveja en								250	250	250	250	250	250
6	Hort. menores							270	270	270				270
7	Alfalfa	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150
8	Vid	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300
9	Durazno	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240
10	Manzano	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240
Total has cultivadas		930	930	1430	1430	1430	1930	2250	2350	2350	2080	2080	1580	2850

Fuente: Estudio TESA.

Por otro lado, en el reporte generado en el ABRO 3.0 versión 2, se observa que de las 2850 has programadas o propuestas, con la disponibilidad de agua existente para el riego, se llegan a regar 2424,65 has bajo riego óptimo, lo que significa que se estaría aprovechando aproximadamente un 85, 08 % de la superficie programada o propuesta.

El caudal de demanda para la situación con proyecto contemplado en el estudio TESA, es el siguiente:

Tabla 4.24. Demanda de riego calculada por el estudio TESA.

DEMANDA													
EFICIENCIA TOTAL = 0.575344	Eficiencia de Captación = 0.95			Eficiencia de Conducción = 0.95			Eficiencia de Distribución = 0.85			Eficiencia de Aplicación = 0.75			
Req. Bruto Total (mm)	126.65	118.97	100.23	192.31	230.37	117.73	46.10	37.44	54.59	67.06	120.65	83.60	1,295.69
DEMANDA TOTAL (l/s)	62.35	56.68	455.24	902.63	1,046.38	745.81	329.47	279.46	451.14	443.06	823.68	146.05	5,741.97
DEMANDA TOTAL (m3)	161,623.71	151,815.38	1,219,318.83	2,339,627.49	2,802,636.21	1,933,150.60	882,448.61	748,514.03	1,091,404.17	1,186,682.38	2,134,971.48	391,171.57	5,043,364.40
Caudal Unitario Bruto (l/s/ha)	0.49	0.44	0.37	0.74	0.86	0.45	0.17	0.14	0.23	0.25	0.47	0.31	4.93

Fuente: Estudio TESA.

El calendario productivo de los cultivos considerados en la cédula de cultivos propuesta para la situación con proyecto, se presenta a continuación en la siguiente tabla:

Tabla 4.25. Calendario productivo propuesto de los cultivos.

N°	Cultivo (Has)	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY
1	Maíz grano						S					C	
2	Maíz choclo			S				C					
3	Papa miska			S			C						
4	Papa verano							S					C
5	Arveja en verde								S				C
6	Hort. menores							ST		C			
7	Alfalfa	CR		B		CR		CR		CR		CR	
8	Vid			B	B						C	C	
9	Durazno			B	B						C	C	
10	Manzano			B	B						C	C	

Simbología: S = Siembra, T = Trasplante, C = Cosecha, CR = Corte, B = Brotación.

Fuente: Estudio TESA.

La zona cuenta con coeficientes de cultivo (Kc) determinados experimentalmente por el PRONAR.

Tabla 4.26. Periodo vegetativo y coeficiente de cultivo.

CULTIVO	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY
Maíz grano						0,24	0,41	0,80	1,08	1,03	0,80	
Maíz choclo			0,24	0,41	0,80	1,08	1,03					
Papa precoz			0,24	0,74	1,02	0,48						
Papa tardía							0,24	0,74	1,02	0,75	0,61	0,48
Arveja verde								0,41	0,78	1,15	1,05	
Hortalizas menores							0,38	1,00	0,90			
Alfalfa	0,82	0,67	0,71	1,09	1,13	0,70	1,14	1,15	0,66	0,83	1,07	0,66
Vid			0,45	0,60	0,70	0,70	0,70	0,65	0,50	0,30		
Durazno			0,55	0,95	1,05	1,15	1,15	1,15	1,10	0,90	0,85	
Manzano			0,50	0,75	0,95	1,00	1,00	0,95	0,90	0,85	0,70	

Fuente: Estudio TESA.

Las demandas usadas en la regulación del presente proyecto, serán estimadas de manera iterativa para los diferentes escenarios analizados, reduciendo proporcionalmente las áreas

de riego de la tabla 4.19., este proceso se realizará en el ABRO, manteniendo los demás datos climáticos, de aplicación y operación igual que el estudio TESA.

4.3.4.2. Caudal ecológico.

El caudal ecológico se asumirá según las “Guías para la elaboración de estudios de diseño técnico de preinversión para proyectos de riego (menores, medianos y mayores)” elaborado por el Ministerio de Medio Ambiente y Agua y el Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego (2018); el cual menciona lo siguiente:

Así mismo, se deberá establecer el caudal ecológico, en base a recomendaciones de las prácticas de análisis para la conservación ambiental, o un mínimo de 10% del caudal medio de cada mes.

En este caso, ya que el embalse “Sella – Rumicancha”, pertenecen a una quebrada, y no un río, se asumirá el 10% del caudal medio de cada mes con una persistencia del 75%.

4.4. Escenarios de regulación del embalse según la variabilidad en la oferta hídrica.

Los escenarios analizados vienen determinados por la oferta hídrica, propuesta en el estudio TESA, de los trasvases (desde Chaupicancha y Negro Muerto) y del sistema de aducción (Jarcas – Rumicancha).

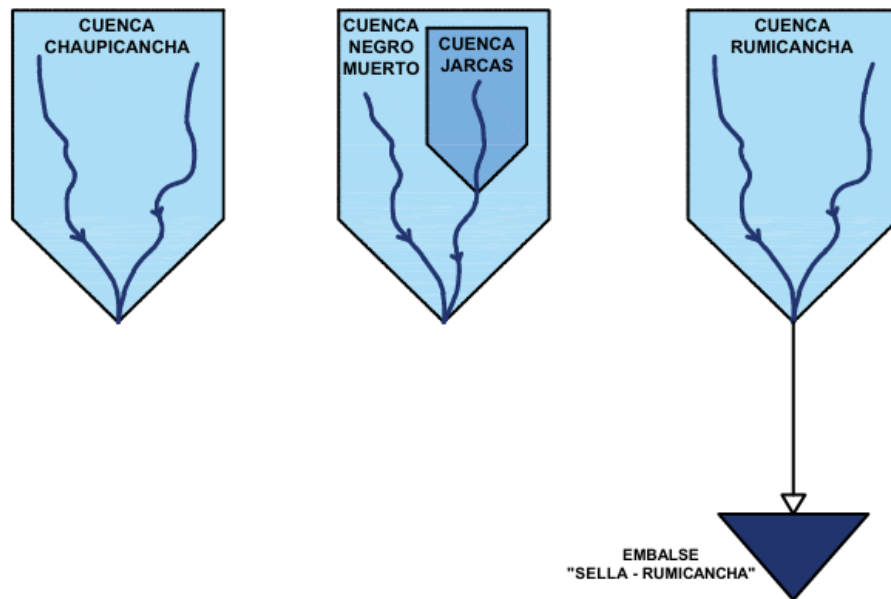
Como se mencionó anteriormente, actualmente el embalse solo opera con el aporte de su cuenca, con ayuda de estos escenarios propuestos, se busca analizar a través de una regulación las diferentes alternativas de operación del embalse frente a la funcionalidad de uno o más aportes propuestos por el estudio TESA.

Los escenarios propuestos son los siguientes (para mejor interpretación de los escenarios ver las figuras 4.21. y 4.22.):

➤ Escenario 1, aporte: Subcuenca Rumicancha.

En este escenario, se analiza la operación del embalse en ausencia de trasvases adicionales, trabajando únicamente con el aporte natural de la cuenca Rumicancha que desemboca directamente en el embalse. Este análisis representa el funcionamiento actual del embalse sin infraestructura de trasvase adicional.

Figura 4.34. Esquema de aportes: escenario 1.

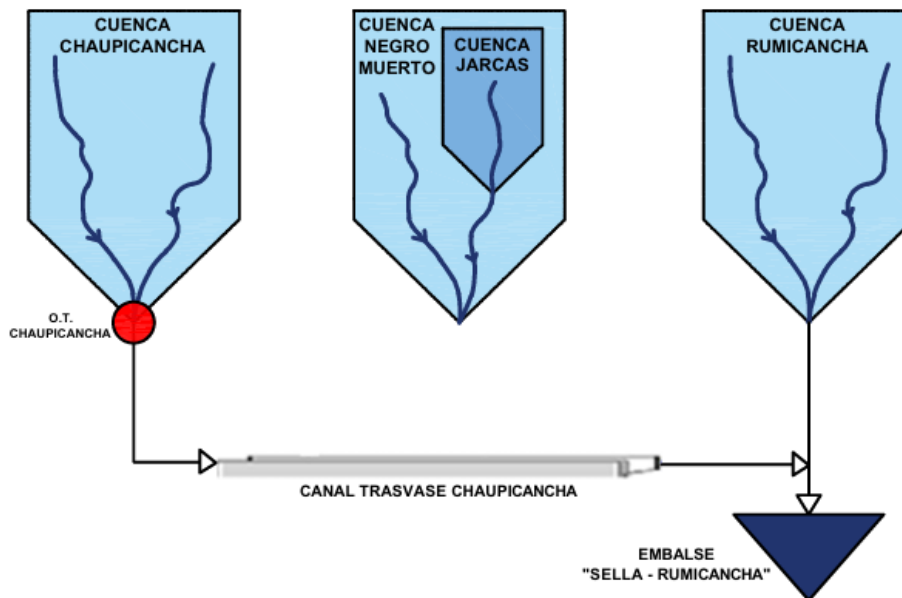


Fuente: Elaboración propia.

➤ **Escenario 2, aporte: Subcuenca Rumicancha y trasvase Chaupicancha.**

En este caso, la operación del embalse se analiza con la construcción del canal de trasvase “Chaupicancha”, al cual aporta la subcuenca Chaupicancha (unidad hidrológica dentro del modelo: UH_Chaupicancha).

Figura 4.35. Esquema de aportes: escenario 2.

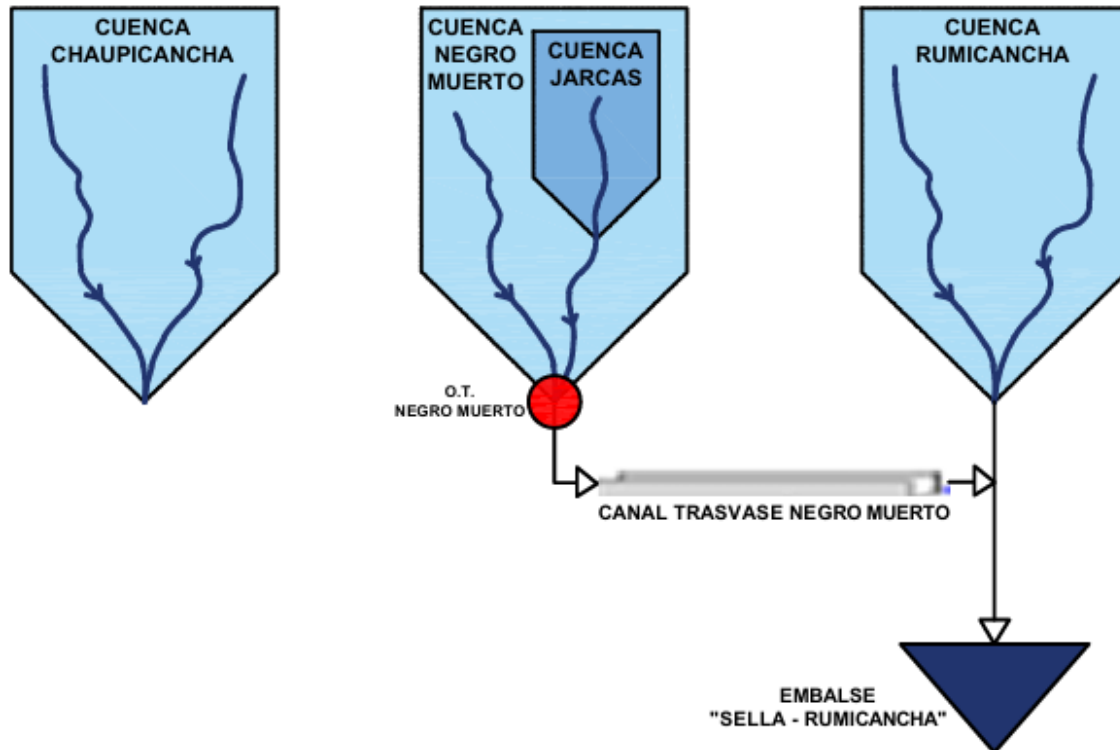


Fuente: Elaboración propia.

➤ **Escenario 3, aporte: Subcuenca Rumicancha y trasvase Negro Muerto (con aporte de Jarcas).**

En este caso, la operación del embalse se analiza con la construcción del canal de trasvase “Negro Muerto”, al cual aporta las subcuencas Negro Muerto y Jarcas (unidad hidrológica dentro del modelo: UH_Chaupicancha y UH_Jarcas).

Figura 4.36. Esquema de aportes: escenario 3.



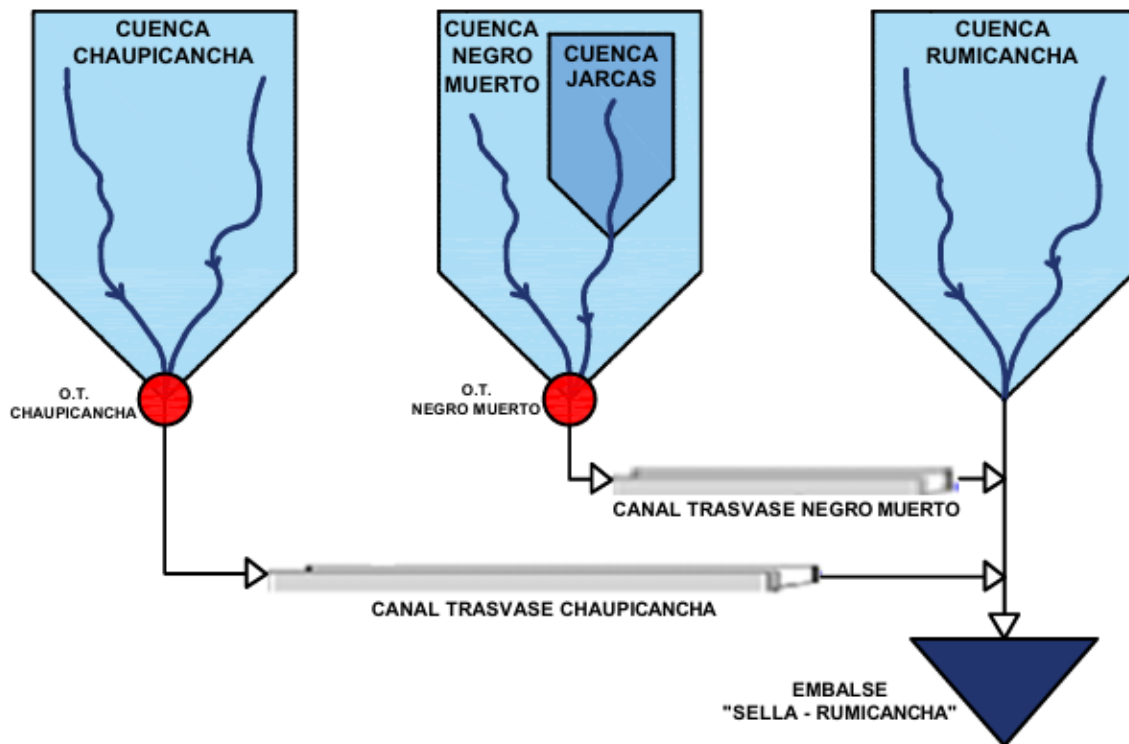
Fuente: Elaboración propia.

➤ **Escenario 4, aporte: Subcuenca Rumicancha, trasvases Chaupicancha y Negro Muerto (con aporte de Jarcas).**

Se analiza la operación del embalse con la construcción de los canales de trasvases desde las obras de toma: Chaupicancha y Negro Muerto.

El trasvase Negro Muerto cuenta con el aporte de la sub cuenca Negro muerto y Jarcas (ver figura 4.22), reflejando un escenario donde no se construye la presa “Jarcas”, permitiendo que las dos subcuencas mencionadas contribuyan al flujo derivado hacia el embalse.

Figura 4.37. Esquema de aportes: escenario 4.



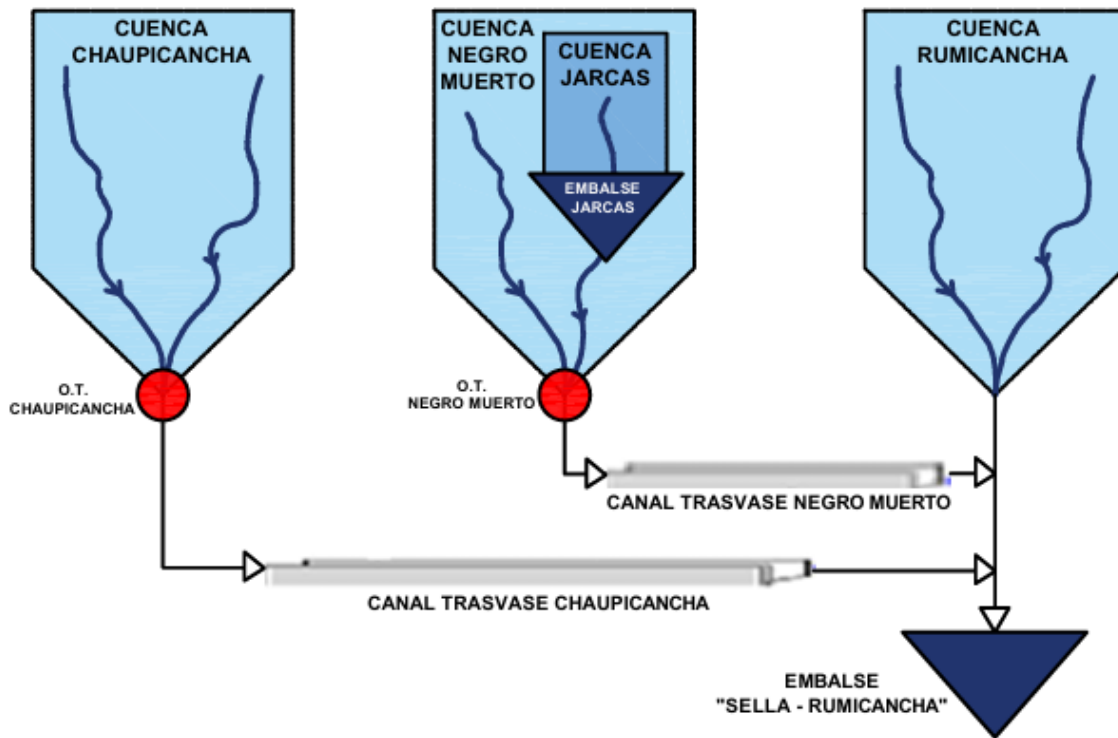
Fuente: Elaboración propia.

➤ **Escenario 5, aporte: Subcuenca Rumicancha, trasvases Chaupicancha y Negro Muerto.**

La operación del embalse será analizada con la construcción de los canales de trasvases desde las obras de toma: Chaupicancha y Negro Muerto.

El trasvase Negro Muerto únicamente recibe el aporte de la subcuenca Negro Muerto (ver figura 4.22), bajo el supuesto de que se construya el embalse "Jarcas" sin el sistema de aducción "Jarcas – Rumicancha". En este caso, el embalse "Jarcas" retendría el aporte de la subcuenca Jarcas, dejando que solo el flujo de Negro Muerto alimente el trasvase.

Figura 4.38. Esquema de aportes: escenario 5.

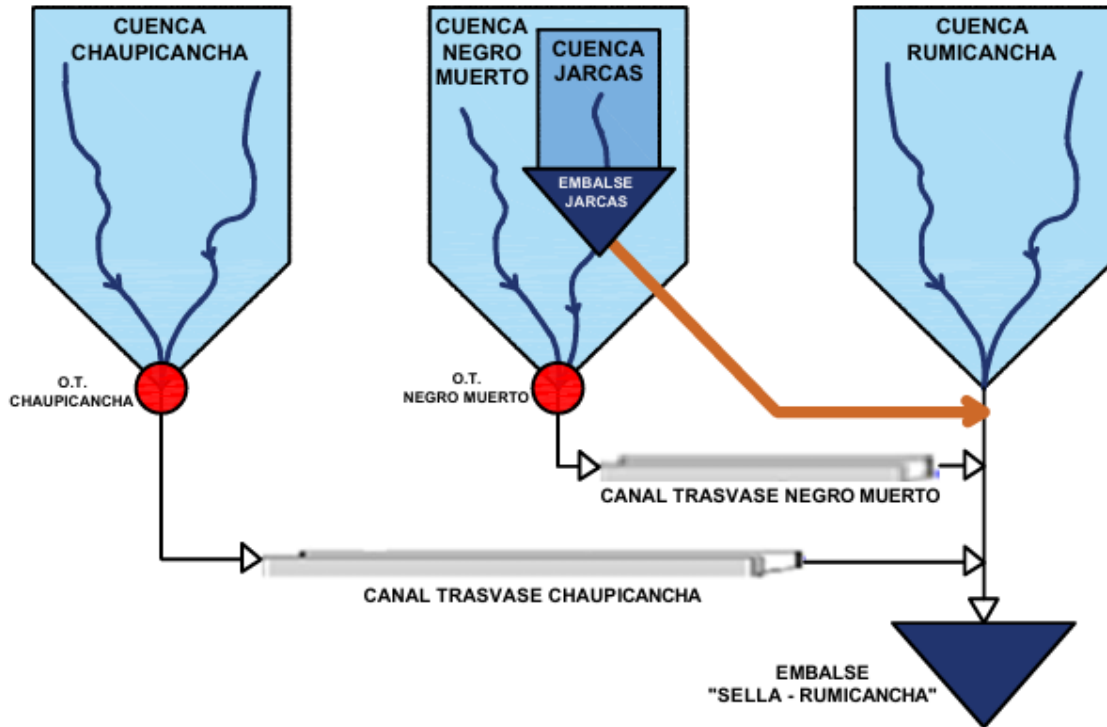


Fuente: Elaboración propia.

- **Escenario 6, aporte: Subcuenca Rumicancha, trasvases de Chaupicancha y Negro Muerto y sistema de aducción “Jarcas – Rumicancha”.**

Este escenario representa el caso óptimo para el embalse “Sella – Rumicancha” propuesto por el estudio TESA, en el que se dispone de la infraestructura completa de los trasvases de Chaupicancha y Negro Muerto, y el sistema de aducción Jarcas – Rumicancha, incluyendo la construcción de la presa "Jarcas". Aquí se maximiza la captación y regulación del recurso hídrico, evaluando el embalse en el supuesto de su capacidad operativa total.

Figura 4.39. Esquema de aportes: escenario 6.



Fuente: Elaboración propia.

Todos los escenarios analizados serán realizados para un año seco en términos de oferta hídrica, ya que esta representa la situación más crítica. Las pérdidas por filtración y evaporación (ver tabla 4.20. y 4.21.) serán las mismas para todas las situaciones evaluadas.

El cálculo de las demandas de riego, se realizará de manera iterativa para cada escenario, optimizando al máximo la relación oferta vs. demanda. La demanda mensual será calculada con el ABRO 3.0 versión 2 manteniendo las condiciones del estudio TESA.

4.4.1. Escenario 1, aporte: Subcuenca Rumicancha.

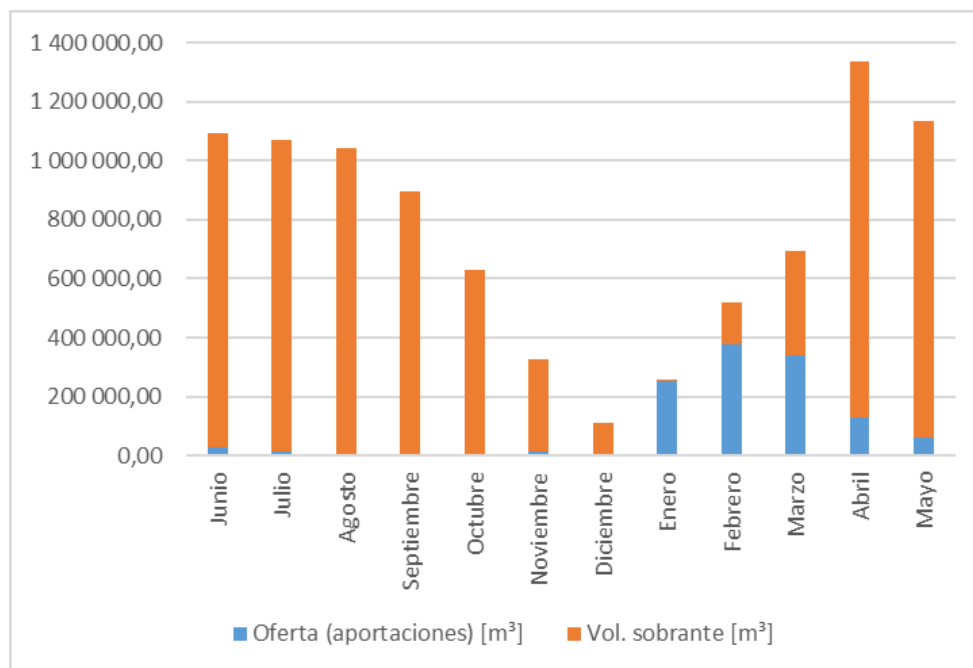
La oferta total de cada mes viene determinada por las aportaciones propia de la cuenca y el volumen sobrante del mes anterior, la variación mensual de la oferta se detalla a continuación:

Tabla 4.27. Volúmenes mensuales de oferta: escenario 1.

Mes	Oferta (aportaciones) [m³]	Vol. sobrante [m³]	Total [m³]
Junio	28 752,15	1 065 702,44	1 094 454,59
Julio	14 156,45	1 056 938,83	1 071 095,28
Agosto	7 387,94	1 035 315,01	1 042 702,95
Septiembre	4 976,24	891 158,39	896 134,63
Octubre	5 551,23	625 625,10	631 176,33
Noviembre	15 259,43	313 521,93	328 781,36
Diciembre	794,17	108 026,34	108 820,52
Enero	254 050,73	5 756,06	259 806,79
Febrero	378 263,59	142 724,32	520 987,91
Marzo	341 423,27	353 278,27	694 701,54
Abril	128 445,55	1 207 597,93	1 336 043,48
Mayo	59 961,78	1 072 569,01	1 132 530,79
Total=	1 239 022,52	7 878 213,65	9 117 236,17

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.40. Variación mensual de la oferta total del embalse: escenario 1.



Fuente: Elaboración propia.

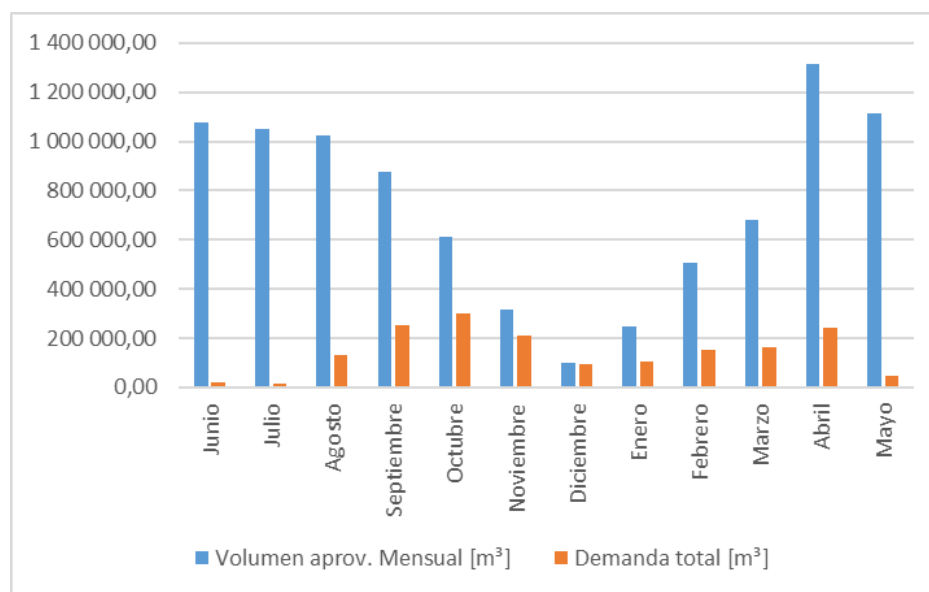
El inicio de operación del embalse corresponde al mes de abril, con un volumen de 1 207 597,93 m³, que resulta de la oferta hídrica del año disminuyendo las pérdidas por filtración y evaporación. A continuación, se detallará la variación mensual del volumen aprovechable (oferta menos pérdidas) frente a las demandas.

Tabla 4.28. Volumen aprovechable mensual y volúmenes de demandas: escenario 1.

Mes	Volumen aprov. Mensual [m ³]	Riego [m ³]	Caudal ecológico [m ³]	Demanda total [m ³]
Junio	1 077 102,69	17 288,64	2 875,22	20 163,86
Julio	1 052 961,76	16 231,10	1 415,65	17 646,75
Agosto	1 022 308,48	130 411,30	738,79	131 150,09
Septiembre	876 380,33	250 257,60	497,62	250 755,22
Octubre	613 870,37	299 793,31	555,12	300 348,43
Noviembre	316 342,05	206 789,76	1 525,94	208 315,70
Diciembre	100 222,30	94 386,82	79,42	94 466,23
Enero	248 186,77	80 057,38	25 405,07	105 462,45
Febrero	507 855,22	116 750,59	37 826,36	154 576,95
Marzo	679 004,16	126 929,38	34 142,33	161 071,70
Abril	1 313 768,77	228 355,20	12 844,55	241 199,75
Mayo	1 113 535,23	41 836,61	5 996,18	47 832,79
Total=	8 921 538,11	1 609 087,68	123 902,25	1 732 989,93

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.41. Variación mensual del volumen aprovechable frente a la demanda total: escenario 1.



Fuente: Elaboración propia.

Las áreas de riego estimadas para este escenario, corresponden a una reducción del 90,9% del total de áreas propuestas por el estudio TESA.

Tabla 4.29. Áreas de cultivo estimadas: escenario 1.

Cultivo	Superficie TESA [ha]	Superficie estimada [ha]
Maíz (grano)	500,00	45,50
Maíz (choclo)	150,00	13,65
Papa (precoz)	350,00	31,85
Papa (tardía)	400,00	36,40
Arveja (verde)	250,00	22,75
Durazno	240,00	21,84
Vid	300,00	27,30
Manzana	240,00	21,84
Alfalfa	150,00	13,65
Hortalizas menores	270,00	24,57
Total=	2850,00	259,35

Fuente: Elaboración propia.

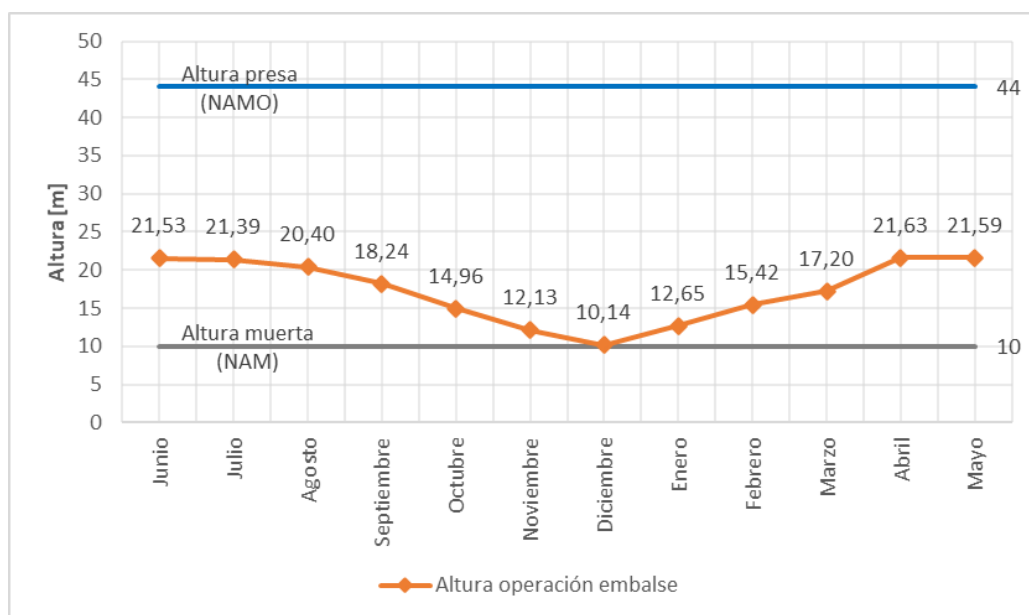
Tabla 4.30. Caudal de demanda por mes de nuevas áreas de cultivo: escenario 1.

Mes	Caudal demanda [l/s]
Junio	6,67
Julio	6,06
Agosto	48,69
Septiembre	96,55
Octubre	111,93
Noviembre	79,78
Diciembre	35,24
Enero	29,89
Febrero	48,26
Marzo	47,39
Abril	88,10
Mayo	15,62
Total=	614,18

Fuente: Elaboración propia.

La altura mínima y máxima alcanzada en este escenario es de 10,14 m y 21,63 m, respectivamente. Con la altura máxima se alcanza un volumen almacenado (incluyendo el volumen hasta el NAM) de 1 135 615,54 m³, que representa el 11,24% de la capacidad total del embalse “Sella – Rumicancha”.

Figura 4.42. Variación mensual de la altura de la presa: escenario 1.



Fuente: Elaboración Propia.

4.4.2. Escenario 2, aporte: Subcuenca Rumicancha y trasvase Chaupicancha.

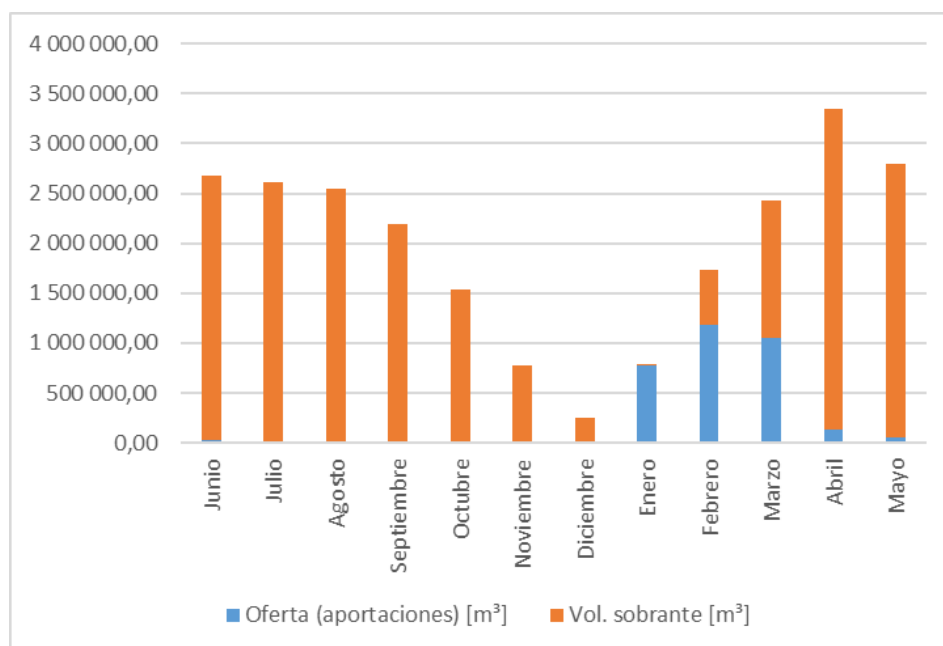
La oferta total de cada mes viene determinada por las aportaciones propia de la cuenca, el trasvase desde Chaupicancha y el volumen sobrante del mes anterior, la variación mensual de la oferta se detalla a continuación:

Tabla 4.31. Volúmenes mensuales de oferta: escenario 2.

Mes	Oferta (aportaciones) [m³]	Vol. sobrante [m³]	Total [m³]
Junio	28 752,15	2 647 020,52	2 675 772,67
Julio	14 156,45	2 598 388,37	2 612 544,82
Agosto	7 387,94	2 537 962,45	2 545 350,39
Septiembre	4 976,24	2 185 127,61	2 190 103,85
Octubre	5 551,23	1 535 052,22	1 540 603,44
Noviembre	15 259,43	767 391,47	782 650,89
Diciembre	794,17	250 824,80	251 618,97
Enero	776 338,73	6 308,39	782 647,12
Febrero	1 188 695,59	540 173,95	1 728 869,54
Marzo	1 051 199,27	1 374 057,97	2 425 257,24
Abril	128 445,55	3 224 076,36	3 352 521,91
Mayo	59 961,78	2 731 677,21	2 791 638,99
Total=	3 281 518,52	20 398 061,33	23 679 579,85

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.43. Variación mensual de la oferta total del embalse: escenario 2.



Fuente: Elaboración propia.

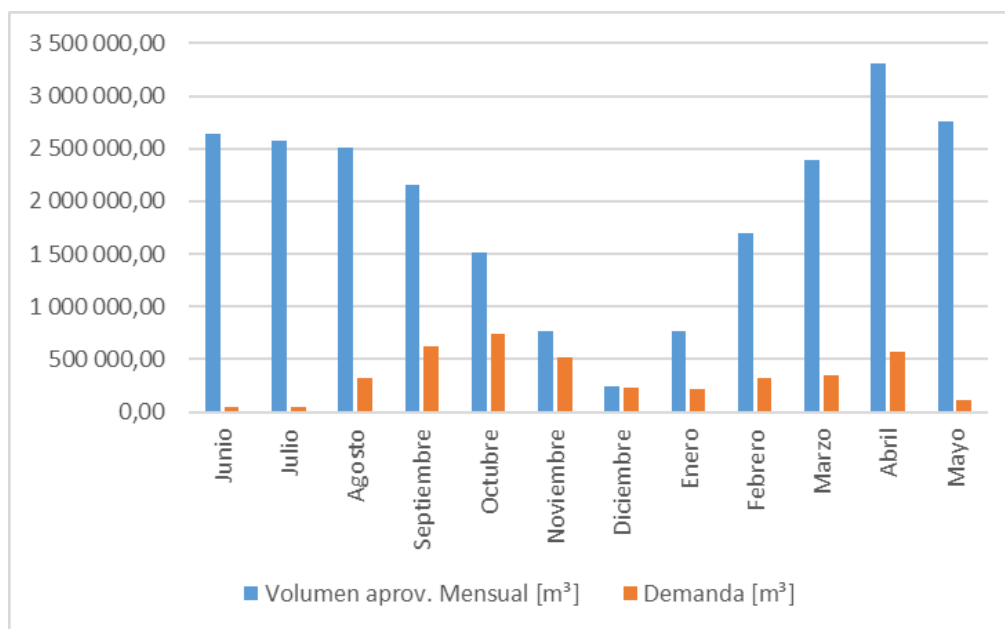
El inicio de operación del embalse corresponde al mes de abril, con un volumen de 3 224 076,36 m³, que resulta de la oferta hídrica del año disminuyendo las pérdidas por filtración y evaporación. A continuación, se detallará la variación mensual del volumen aprovechable (oferta menos pérdidas) frente a las demandas.

Tabla 4.32. Volumen aprovechable mensual y volúmenes de demandas: escenario 2.

Mes	Volumen aprov. Mensual [m³]	Riego [m³]	Caudal ecológico [m³]	Demanda [m³]
Junio	2 644 005,67	42 742,08	2 875,22	45 617,30
Julio	2 579 527,31	40 149,22	1 415,65	41 564,86
Agosto	2 508 345,77	322 479,36	738,79	323 218,15
Septiembre	2 154 312,08	618 762,24	497,62	619 259,86
Octubre	1 509 167,01	741 220,42	555,12	741 775,54
Noviembre	763 622,75	511 272,00	1 525,94	512 797,94
Diciembre	239 756,80	233 368,99	79,42	233 448,41
Enero	763 539,57	197 960,54	25 405,07	223 365,62
Febrero	1 700 519,08	288 634,75	37 826,36	326 461,11
Marzo	2 388 164,12	313 854,91	34 142,33	347 997,24
Abril	3 309 163,05	564 641,28	12 844,55	577 485,83
Mayo	2 756 483,29	103 466,59	5 996,18	109 462,77
Total=	23 316 606,49	3 978 552,38	123 902,25	4 102 454,64

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.44. Variación mensual del volumen aprovechable frente a la demanda total:
escenario 2.



Fuente: Elaboración propia.

Las áreas de riego estimadas para este escenario, corresponden a una reducción del 77,5% del total de áreas propuestas por el estudio TESA.

Tabla 4.33. Áreas de cultivo estimadas: escenario 2.

Cultivo	Superficie [ha]	Superficie estimada [ha]
Maíz (grano)	500,00	112,50
Maíz (choclo)	150,00	33,75
Papa (precoz)	350,00	78,75
Papa (tardía)	400,00	90,00
Arveja (verde)	250,00	56,25
Durazno	240,00	54,00
Vid	300,00	67,50
Manzana	240,00	54,00
Alfalfa	150,00	33,75
Hortalizas menores	270,00	60,75
Total=	2850,00	641,25

Fuente: Elaboración propia.

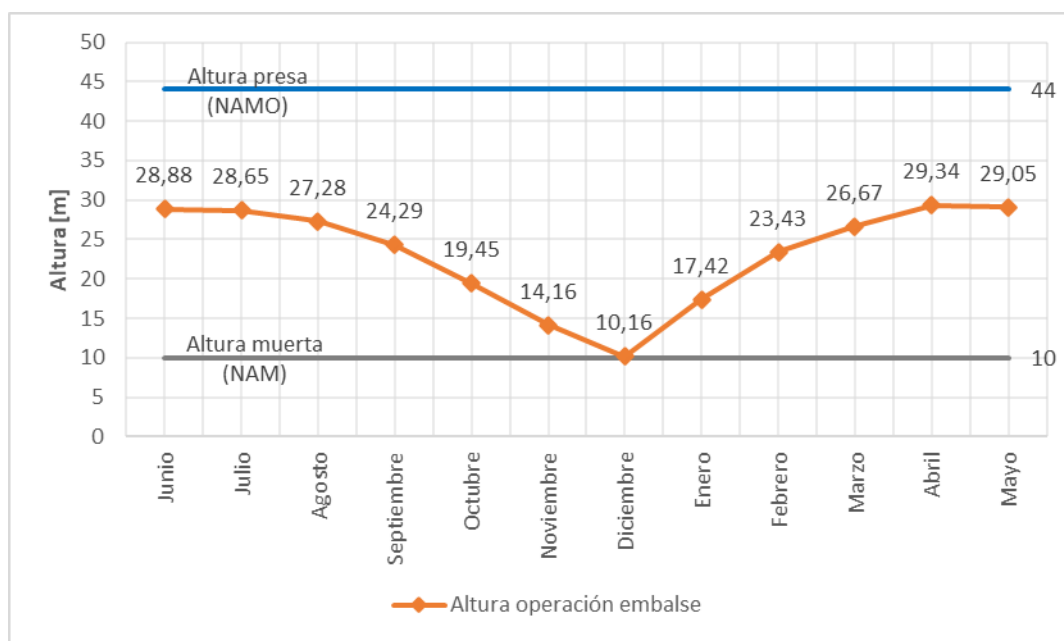
Tabla 4.34. Caudal de demanda por mes de nuevas áreas de cultivo: escenario 2.

Mes	Caudal demanda [l/s]
Junio	16,49
Julio	14,99
Agosto	120,4
Septiembre	238,72
Octubre	276,74
Noviembre	197,25
Diciembre	87,13
Enero	73,91
Febrero	119,31
Marzo	117,18
Abril	217,84
Mayo	38,63
Total=	1 518,59

Fuente: Elaboración propia.

La altura mínima y máxima alcanzada en este escenario es de 10,16 m y 29,34 m, respectivamente. Con la altura máxima se alcanza un volumen almacenado (incluyendo el volumen hasta el NAM) de 2 801 590,31 m³, que representa el 27,56% de la capacidad total del embalse “Sella – Rumicancha”.

Figura 4.45. Variación mensual de la altura de la presa: escenario 2.



Fuente: Elaboración Propia.

4.4.3. Escenario 3, aporte: Subcuenca Rumicancha y trasvase Negro Muerto (con aporte de Jarcas).

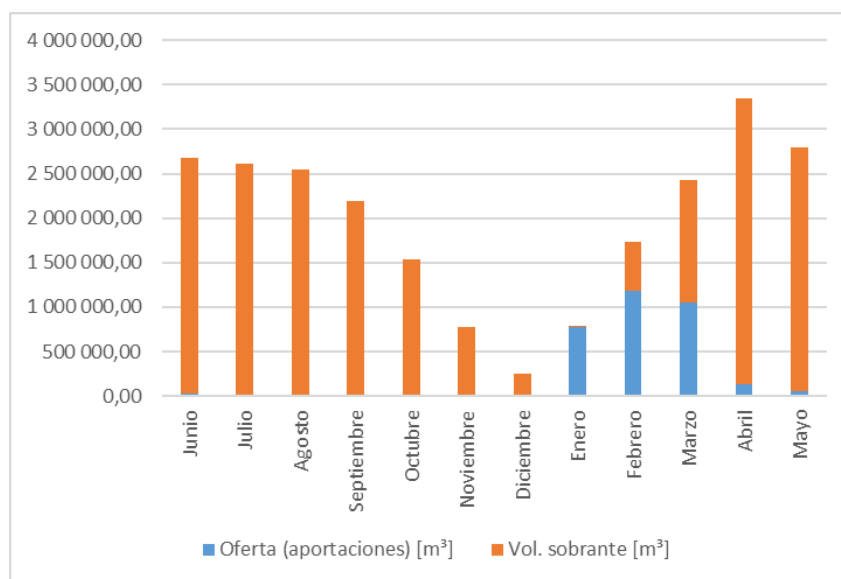
La oferta total de cada mes viene determinada por las aportaciones propia de la cuenca, el trasvase desde Negro muerto (con aporte desde las subcuencas Negro Muerto y Jarcas) y el volumen sobrante del mes anterior, la variación mensual de la oferta se detalla a continuación:

Tabla 4.35. Volúmenes mensuales de oferta: escenario 3.

Mes	Oferta (aportaciones) [m³]	Vol. sobrante [m³]	Total [m³]
Junio	28 752,15	1 991 360,31	2 020 112,46
Julio	14 156,45	1 959 464,99	1 973 621,45
Agosto	7 387,94	1 915 278,45	1 922 666,39
Septiembre	4 976,24	1 649 604,65	1 654 580,89
Octubre	5 551,23	1 159 629,26	1 165 180,48
Noviembre	15 259,43	581 315,21	596 574,64
Diciembre	794,17	194 795,00	195 589,17
Enero	575 458,73	8 981,86	584 440,59
Febrero	850 007,59	394 220,00	1 244 227,60
Marzo	743 183,27	966 618,38	1 709 801,65
Abril	128 445,55	2 386 217,56	2 514 663,11
Mayo	59 961,78	2 043 323,17	2 103 284,95
Total=	2 433 934,52	15 250 808,85	17 684 743,37

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.46. Variación mensual de la oferta total del embalse: escenario 3.



Fuente: Elaboración propia.

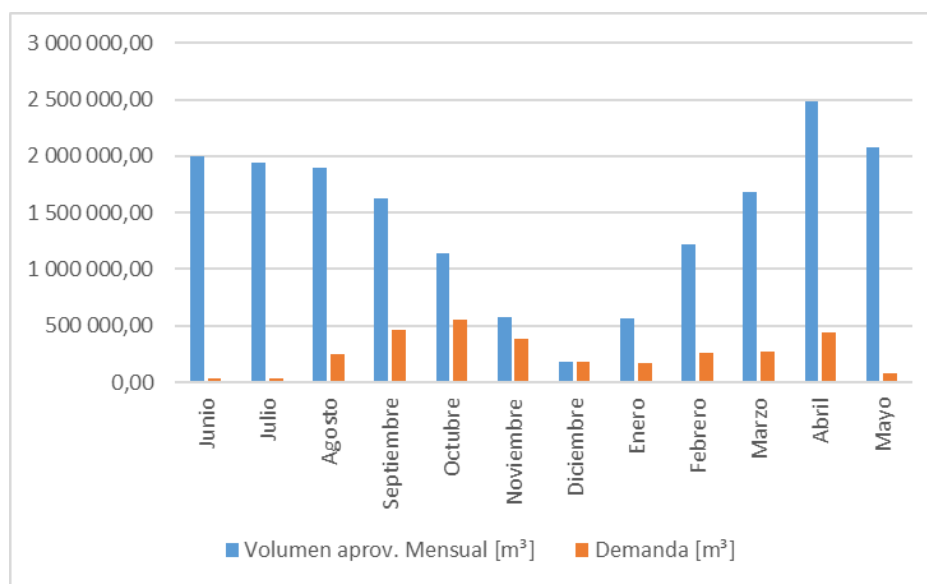
El inicio de operación del embalse corresponde al mes de abril, con un volumen de 2 386 217,56 m³, que resulta de la oferta hídrica del año disminuyendo las pérdidas por filtración y evaporación. A continuación, se detallará la variación mensual del volumen aprovechable (oferta menos pérdidas) frente a las demandas.

Tabla 4.36. Volumen aprovechable mensual y volúmenes de demandas: escenario 3.

Mes	Volumen aprov. Mensual [m ³]	Riego [m ³]	Caudal ecológico [m ³]	Demanda [m ³]
Junio	1 994 455,09	32 114,88	2 875,22	34 990,10
Julio	1 946 852,88	30 158,78	1 415,65	31 574,43
Agosto	1 892 551,16	242 207,71	738,79	242 946,51
Septiembre	1 624 898,40	464 771,52	497,62	465 269,14
Octubre	1 138 602,56	556 732,22	555,12	557 287,35
Noviembre	580 325,74	384 004,80	1 525,94	385 530,74
Diciembre	184 362,56	175 301,28	79,42	175 380,70
Enero	568 303,06	148 677,98	25 405,07	174 083,06
Febrero	1 221 253,45	216 808,70	37 826,36	254 635,06
Marzo	1 680 735,82	235 725,98	34 142,33	269 868,31
Abril	2 480 270,77	424 103,04	12 844,55	436 947,59
Mayo	2 075 056,87	77 700,38	5 996,18	83 696,56
Total=	17 387 668,34	2 988 307,30	123 902,25	3 112 209,55

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.47. Variación mensual del volumen aprovechable frente a la demanda total: escenario 3.



Fuente: Elaboración propia.

Las áreas de riego estimadas para este escenario, corresponden a una reducción del 83,10% del total de áreas propuestas por el estudio TESA.

Tabla 4.37. Áreas de cultivo estimadas: escenario 3.

Cultivo	Superficie [ha]	Superficie estimada [ha]
Maíz (grano)	500,00	84,50
Maíz (choclo)	150,00	25,35
Papa (precoz)	350,00	59,15
Papa (tardía)	400,00	67,60
Arveja (verde)	250,00	42,25
Durazno	240,00	40,56
Vid	300,00	50,70
Manzana	240,00	40,56
Alfalfa	150,00	25,35
Hortalizas menores	270,00	45,63
Total=	2850,00	481,65

Fuente: Elaboración propia.

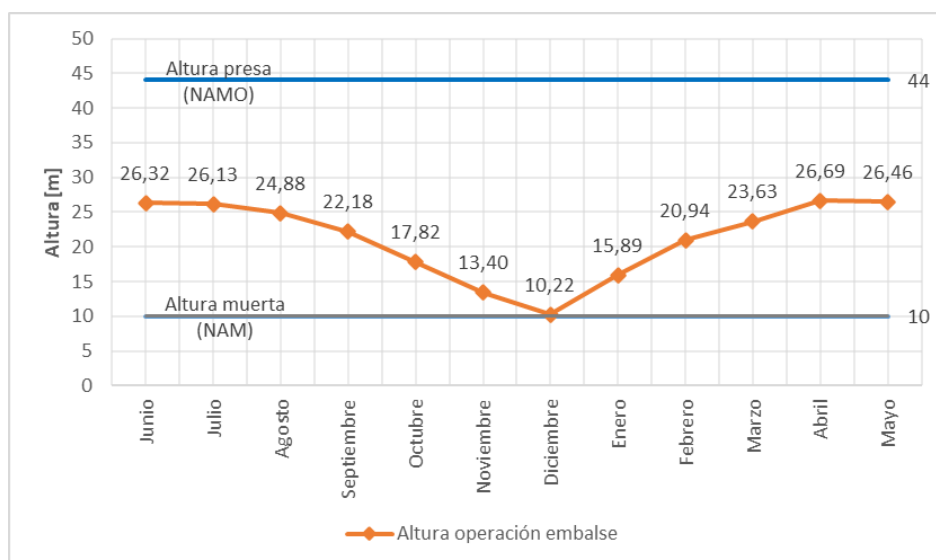
Tabla 4.38. Caudal de demanda por mes de nuevas áreas de cultivo: escenario 3.

Mes	Caudal demanda [l/s]
Junio	12,39
Julio	11,26
Agosto	90,43
Septiembre	179,31
Octubre	207,86
Noviembre	148,15
Diciembre	65,45
Enero	55,51
Febrero	89,62
Marzo	88,01
Abril	163,62
Mayo	29,01
Total=	1 140,62

Fuente: Elaboración propia.

La altura mínima y máxima alcanzada en este escenario es de 10,22 m y 26,69 m, respectivamente. Con la altura máxima se alcanza un volumen almacenado (incluyendo el volumen hasta el NAM) de 2 113 236,27 m³, que representa el 20,79% de la capacidad total del embalse “Sella – Rumicancha”.

Figura 4.48. Variación mensual de la altura de la presa: escenario 3.



Fuente: Elaboración Propia.

4.4.4. Escenario 4, aporte: Subcuenca Rumicancha, trasvases Chaupicancha y Negro Muerto (con aporte de Jarcas).

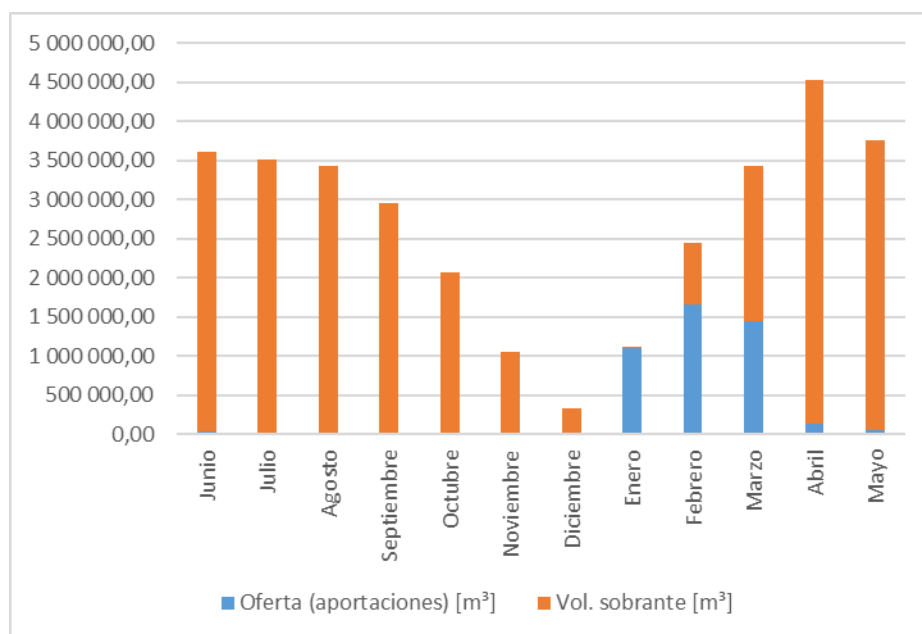
La oferta total de cada mes viene determinada por las aportaciones propia de la cuenca, los trasvases desde Chaupicancha y Negro muerto (con aporte desde las subcuencas Negro Muerto y Jarcas) y el volumen sobrante del mes anterior, la variación mensual de la oferta se detalla a continuación:

Tabla 4.39. Volúmenes mensuales de oferta: escenario 4.

Mes	Oferta (aportaciones) [m³]	Vol. sobrante [m³]	Total [m³]
Junio	28 752,15	3 572 942,60	3 601 694,75
Julio	14 156,45	3 500 703,72	3 514 860,17
Agosto	7 387,94	3 417 271,94	3 424 659,88
Septiembre	4 976,24	2 941 228,79	2 946 205,03
Octubre	5 551,23	2 064 475,67	2 070 026,90
Noviembre	15 259,43	1 029 662,01	1 044 921,43
Diciembre	794,17	328 633,97	329 428,14
Enero	1 097 746,73	1 160,01	1 098 906,74
Febrero	1 660 439,59	781 157,05	2 441 596,65
Marzo	1 452 959,27	1 977 688,17	3 430 647,44
Abril	128 445,55	4 406 532,43	4 534 977,98
Mayo	59 961,78	3 703 553,92	3 763 515,69
Total=	4 476 430,52	27 725 010,29	32 201 440,81

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.49. Variación mensual de la oferta total del embalse: escenario 4.



Fuente: Elaboración propia.

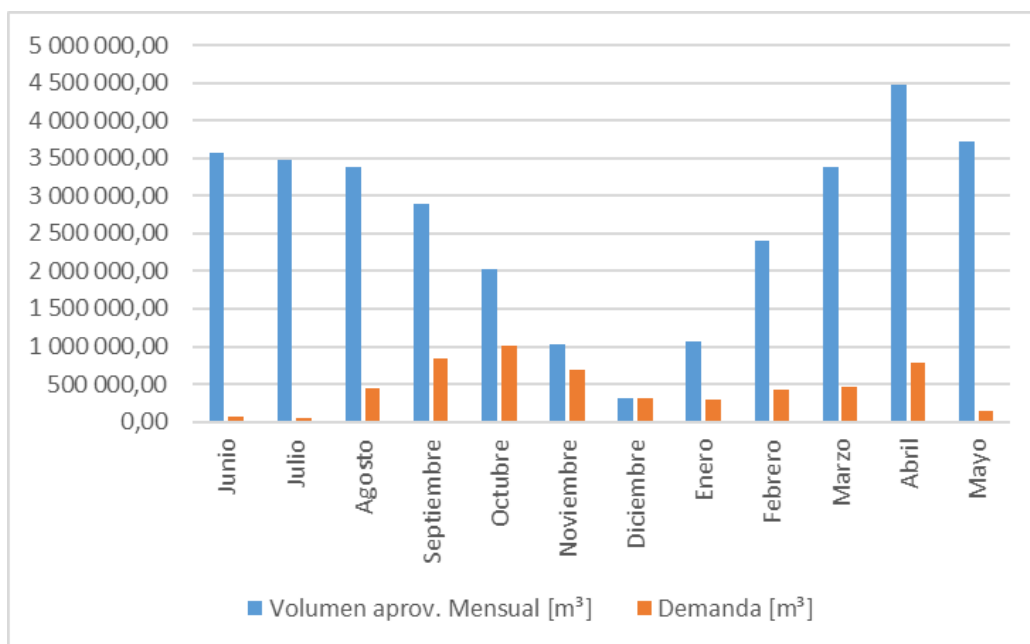
El inicio de operación del embalse corresponde al mes de abril, con un volumen de 4 406 532,43 m³, que resulta de la oferta hídrica del año disminuyendo las pérdidas por filtración y evaporación. A continuación, se detallará la variación mensual del volumen aprovechable (oferta menos pérdidas) frente a las demandas.

Tabla 4.40. Volumen aprovechable mensual y volúmenes de demandas: escenario 4.

Mes	Volumen aprov. Mensual [m³]	Riego [m³]	Caudal ecológico [m³]	Demanda [m³]
Junio	3 561 328,70	57 749,76	2 875,22	60 624,98
Julio	3 472 925,19	54 237,60	1 415,65	55 653,25
Agosto	3 377 662,91	435 695,33	738,79	436 434,12
Septiembre	2 900 996,97	836 023,68	497,62	836 521,30
Octubre	2 031 670,89	1 001 453,76	555,12	1 002 008,88
Noviembre	1 020 927,91	690 768,00	1 525,94	692 293,94
Diciembre	316 567,46	315 328,03	79,42	315 407,45
Enero	1 074 027,15	267 465,02	25 405,07	292 870,10
Febrero	2 405 513,76	389 999,23	37 826,36	427 825,59
Marzo	3 381 624,54	424 044,29	34 142,33	458 186,61
Abril	4 479 275,91	762 877,44	12 844,55	775 721,99
Mayo	3 718 724,47	139 785,70	5 996,18	145 781,87
Total=	31 741 245,88	5 375 427,84	123 902,25	5 499 330,09

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.50. Variación mensual del volumen aprovechable frente a la demanda total:
escenario 4.



Fuente: Elaboración propia.

Las áreas de riego estimadas para este escenario, corresponden a una reducción del 69,6% del total de áreas propuestas por el estudio TESA.

Tabla 4.41. Áreas de cultivo estimadas: escenario 4.

Cultivo	Superficie [ha]	Superficie estimada [ha]
Maíz (grano)	500,00	152,00
Maíz (choclo)	150,00	45,60
Papa (precoz)	350,00	106,40
Papa (tardía)	400,00	121,60
Arveja (verde)	250,00	76,00
Durazno	240,00	72,96
Vid	300,00	91,20
Manzana	240,00	72,96
Alfalfa	150,00	45,60
Hortalizas menores	270,00	82,08
Total=	2850,00	866,40

Fuente: Elaboración propia.

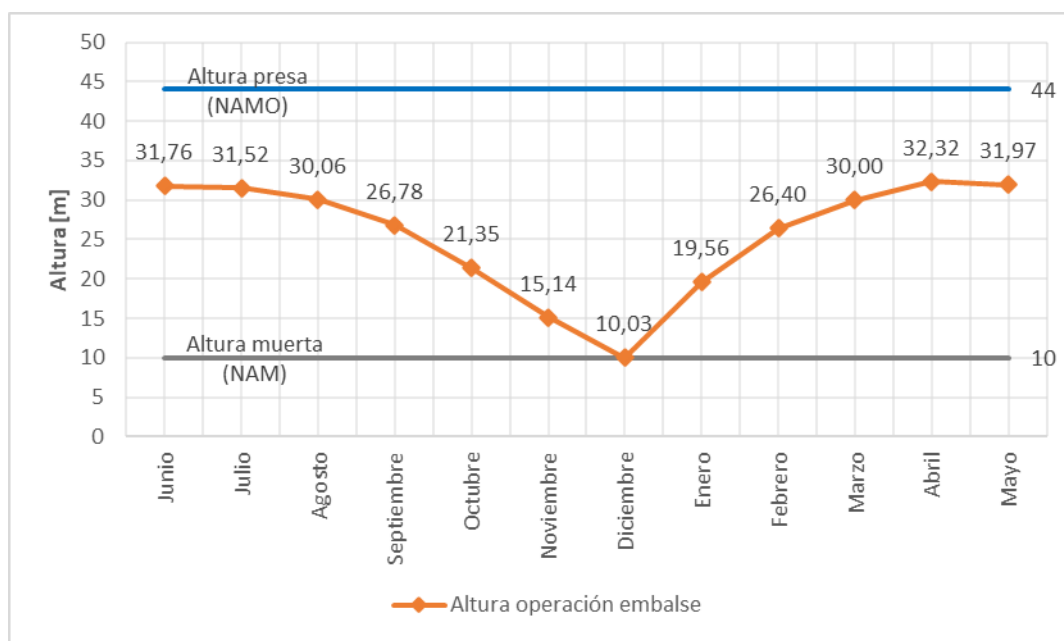
Tabla 4.42. Caudal de demanda por mes de nuevas áreas de cultivo: escenario 4.

Mes	Caudal demanda [l/s]
Junio	22,28
Julio	20,25
Agosto	162,67
Septiembre	322,54
Octubre	373,9
Noviembre	266,5
Diciembre	117,73
Enero	99,86
Febrero	161,21
Marzo	158,32
Abril	294,32
Mayo	52,19
Total=	2 051,77

Fuente: Elaboración propia.

La altura mínima y máxima alcanzada en este escenario es de 10,03 m y 32,32 m, respectivamente. Con la altura máxima se alcanza un volumen almacenado (incluyendo el volumen hasta el NAM) de 3 773 467,01 m³, que representa el 37,12% de la capacidad total del embalse “Sella – Rumicancha”.

Figura 4.51. Variación mensual de la altura de la presa: escenario 4.



Fuente: Elaboración Propia.

4.4.5. Escenario 5, aporte: Subcuenca Rumicancha, trasvases Chaupicancha y Negro Muerto.

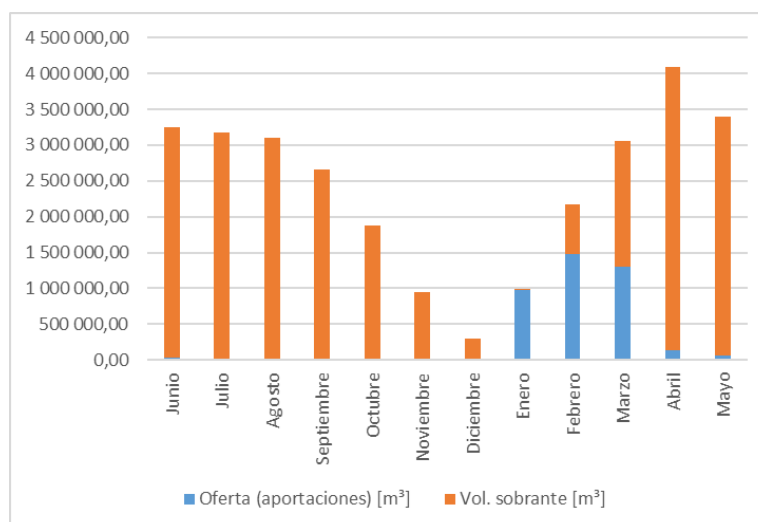
La oferta total de cada mes viene determinada por las aportaciones propia de la cuenca con los trasvases desde Chaupicancha y Negro muerto (solo aporte de la subcuenca Negro Muerto) y el volumen sobrante del mes anterior, la variación mensual de la oferta se detalla a continuación:

Tabla 4.43. Volúmenes mensuales de oferta: escenario 5.

Mes	Oferta (aportaciones) [m³]	Vol. sobrante [m³]	Total [m³]
Junio	28 752,15	3 225 494,16	3 254 246,31
Julio	14 156,45	3 162 143,50	3 176 299,95
Agosto	7 387,94	3 087 379,96	3 094 767,90
Septiembre	4 976,24	2 658 107,57	2 663 083,81
Octubre	5 551,23	1 867 274,09	1 872 825,32
Noviembre	15 259,43	933 706,87	948 966,30
Diciembre	794,17	302 571,44	303 365,61
Enero	977 218,73	6 643,73	983 862,46
Febrero	1 478 999,59	694 381,84	2 173 381,43
Marzo	1 305 647,27	1 751 104,35	3 056 751,62
Abril	128 445,55	3 961 782,61	4 090 228,16
Mayo	59 961,78	3 338 772,87	3 398 734,64
Total=	4 027 150,52	24 989 363,02	29 016 513,54

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.52. Variación mensual de la oferta total del embalse: escenario 5.



Fuente: Elaboración propia.

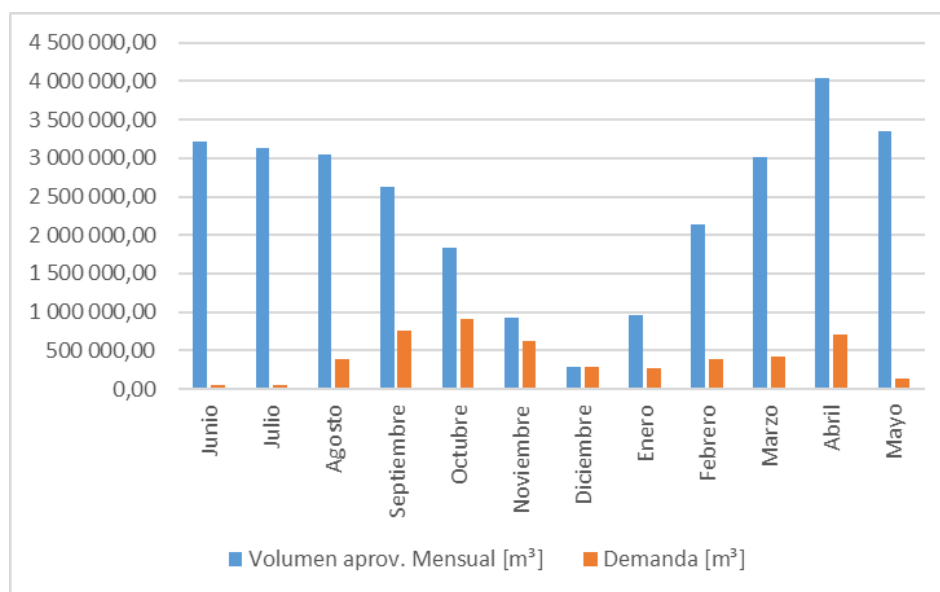
El inicio de operación del embalse corresponde al mes de abril, con un volumen de 3 961 782,61 m³, que resulta de la oferta hídrica del año disminuyendo las pérdidas por filtración y evaporación. A continuación, se detallará la variación mensual del volumen aprovechable (oferta menos pérdidas) frente a las demandas.

Tabla 4.44. Volumen aprovechable mensual y volúmenes de demandas: escenario 5.

Mes	Volumen aprov. Mensual [m ³]	Riego [m ³]	Caudal ecológico [m ³]	Demanda [m ³]
Junio	3 217 066,08	52 047,36	2 875,22	54 922,58
Julio	3 137 703,19	48 907,58	1 415,65	50 323,23
Agosto	3 051 553,37	392 707,01	738,79	393 445,80
Septiembre	2 621 292,04	753 520,32	497,62	754 017,94
Octubre	1 836 909,58	902 647,58	555,12	903 202,71
Noviembre	926 695,79	622 598,40	1 525,94	624 124,34
Diciembre	290 928,17	284 205,02	79,42	284 284,44
Enero	960 869,70	241 082,78	25 405,07	266 487,86
Febrero	2 140 440,47	351 509,76	37 826,36	389 336,12
Marzo	3 012 201,11	382 180,90	34 142,33	416 323,22
Abril	4 039 223,18	687 605,76	12 844,55	700 450,31
Mayo	3 357 482,28	125 991,94	5 996,18	131 988,11
Total=	28 592 364,97	4 845 004,42	123 902,25	4 968 906,67

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.53. Variación mensual del volumen aprovechable frente a la demanda total: escenario 5.



Fuente: Elaboración propia.

Las áreas de riego estimadas para este escenario, corresponden a una reducción del 72,6% del total de áreas propuestas por el estudio TESA.

Tabla 4.45. Áreas de cultivo estimadas: escenario 5.

Cultivo	Superficie [ha]	Superficie estimada [ha]
Maíz (grano)	500,00	137,00
Maíz (choclo)	150,00	41,10
Papa (precoz)	350,00	95,90
Papa (tardía)	400,00	109,60
Arveja (verde)	250,00	68,50
Durazno	240,00	65,76
Vid	300,00	82,20
Manzana	240,00	65,76
Alfalfa	150,00	41,10
Hortalizas menores	270,00	73,98
Total=	2850,00	780,90

Fuente: Elaboración propia.

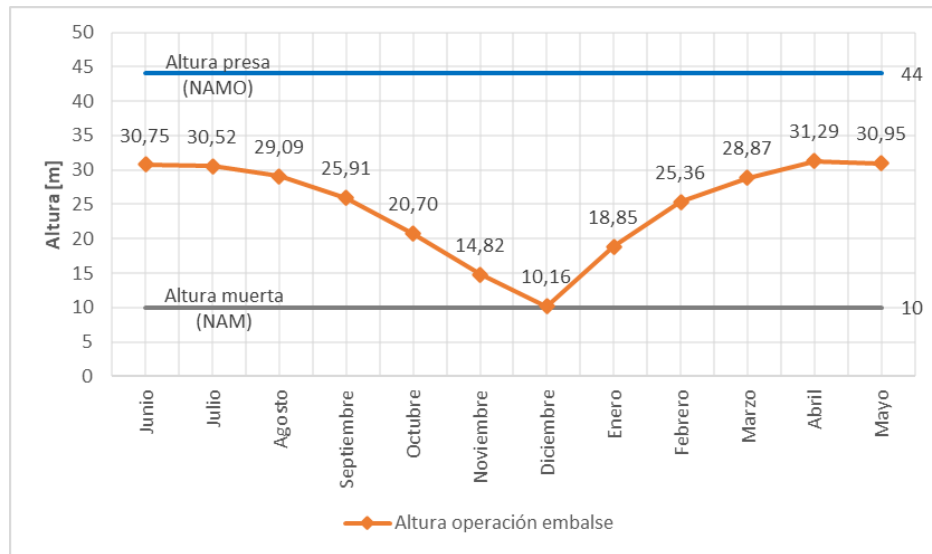
Tabla 4.46. Caudal de demanda por mes de nuevas áreas de cultivo: escenario 5.

Mes	Caudal demanda [l/s]
Junio	20,08
Julio	18,26
Agosto	146,62
Septiembre	290,71
Octubre	337,01
Noviembre	240,2
Diciembre	106,11
Enero	90,01
Febrero	145,3
Marzo	142,69
Abril	265,28
Mayo	47,04
Total=	1 849,31

Fuente: Elaboración propia.

La altura mínima y máxima alcanzada en este escenario es de 10,16 m y 31,29 m, respectivamente. Con la altura máxima se alcanza un volumen almacenado (incluyendo el volumen hasta el NAM) de 3 408 685,96 m³, que representa el 33,53% de la capacidad total del embalse “Sella – Rumicanca”.

Figura 4.54. Variación mensual de la altura de la presa: escenario 5.



Fuente: Elaboración Propia.

4.4.6. Escenario 6, aporte: Subcuenca Rumicancha, trasvases de Chaupicancha y Negro Muerto y sistema de aducción “Jarcas – Rumicancha”

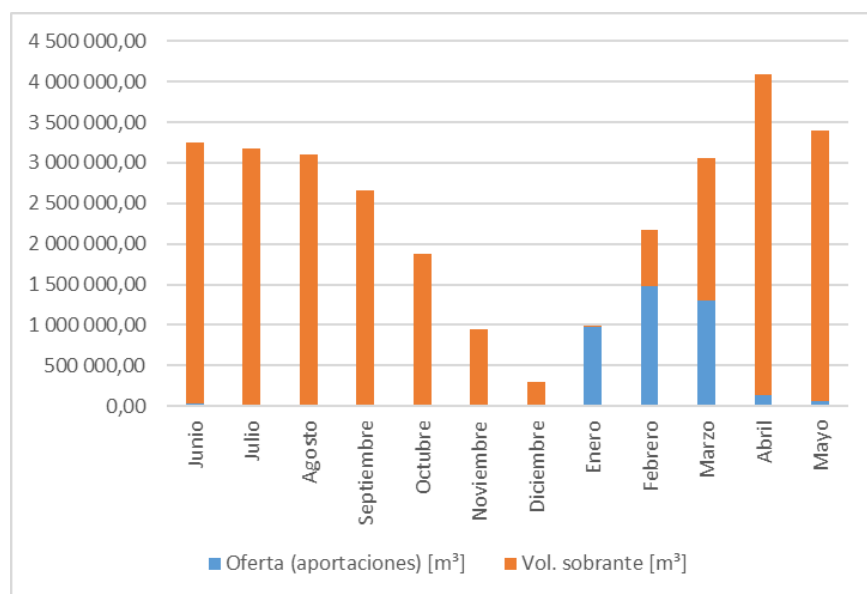
La oferta total de cada mes viene determinada por las aportaciones propia de la cuenca, con los trasvases desde Chaupicancha, Negro muerto (solo aporte de la subcuenca Negro Muerto) y el sistema de aducción “Jarcas – Rumi cancha”, y el volumen sobrante del mes anterior, la variación mensual de la oferta se detalla a continuación:

Tabla 4.47. Volúmenes mensuales de oferta: escenario 6.

Mes	Oferta (aportaciones) [m³]	Vol. sobrante [m³]	Total [m³]
Junio	28 752,15	3 369 815,02	3 398 567,17
Julio	14 156,45	3 298 279,24	3 312 435,69
Agosto	7 387,94	3 215 722,71	3 223 110,65
Septiembre	134 576,24	2 733 361,20	2 867 937,44
Octubre	139 471,23	1 970 660,41	2 110 131,64
Noviembre	15 259,43	1 049 501,08	1 064 760,51
Diciembre	794,17	334 551,21	335 345,38
Enero	977 218,73	760,42	977 979,15
Febrero	1 478 999,59	656 945,93	2 135 945,52
Marzo	1 305 647,27	1 667 873,02	2 973 520,29
Abril	128 445,55	4 217 407,28	4 345 852,83
Mayo	59 961,78	3 501 225,07	3 561 186,84
Total=	4 290 670,52	26 016 102,59	30 306 773,11

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.55. Variación mensual de la oferta total del embalse: escenario 5.



Fuente: Elaboración propia.

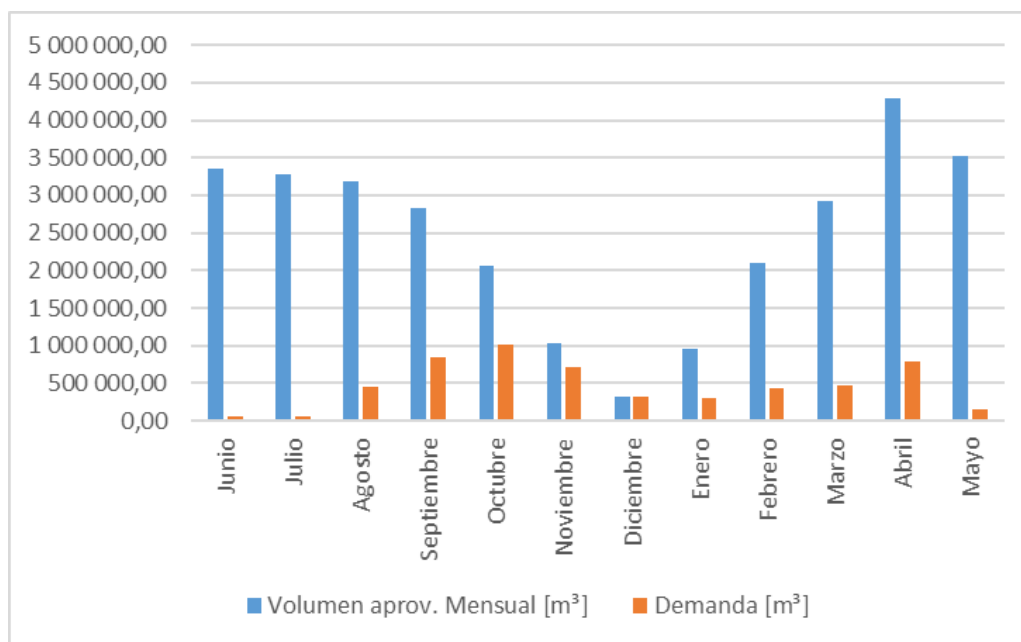
El inicio de operación del embalse corresponde al mes de abril, con un volumen de 4 217 407,28 m³, que resulta de la oferta hídrica del año disminuyendo las perdidas por filtración y evaporación. A continuación, se detallará la variación mensual del volumen aprovechable (oferta menos perdidas) frente a las demandas.

Tabla 4.48. Volumen aprovechable mensual y volúmenes de demandas: escenario 6.

Mes	Volumen aprov. Mensual [m³]	Riego [m³]	Caudal ecológico [m³]	Demanda [m³]
Junio	3 360 044,70	58 890,24	2 875,22	61 765,46
Julio	3 272 447,31	55 308,96	1 415,65	56 724,61
Agosto	3 178 392,99	444 292,99	738,79	445 031,79
Septiembre	2 823 666,84	852 508,80	497,62	853 006,42
Octubre	2 071 276,56	1 021 220,35	555,12	1 021 775,47
Noviembre	1 040 479,07	704 401,92	1 525,94	705 927,86
Diciembre	322 381,75	321 541,92	79,42	321 621,34
Enero	955 092,47	272 741,47	25 405,07	298 146,54
Febrero	2 103 391,67	397 692,29	37 826,36	435 518,65
Marzo	2 929 970,75	432 400,90	34 142,33	466 543,22
Abril	4 292 006,58	777 936,96	12 844,55	790 781,51
Mayo	3 518 355,65	142 544,45	5 996,18	148 540,63
Total=	29 867 506,34	5 481 481,25	123 902,25	5 605 383,50

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.56. Variación mensual del volumen aprovechable frente a la demanda total:
escenario 6.



Fuente: Elaboración propia.

Las áreas de riego estimadas para este escenario, corresponden a una reducción del 69,00% del total de áreas propuestas por el estudio TESA.

Tabla 4.49. Áreas de cultivo estimadas: escenario 6.

Cultivo	Superficie [ha]	Superficie estimada [ha]
Maíz (grano)	500,00	155,00
Maíz (choclo)	150,00	46,50
Papa (precoz)	350,00	108,50
Papa (tardía)	400,00	124,00
Arveja (verde)	250,00	77,50
Durazno	240,00	74,40
Vid	300,00	93,00
Manzana	240,00	74,40
Alfalfa	150,00	46,50
Hortalizas menores	270,00	83,70
Total=	2850,00	883,50

Fuente: Elaboración propia.

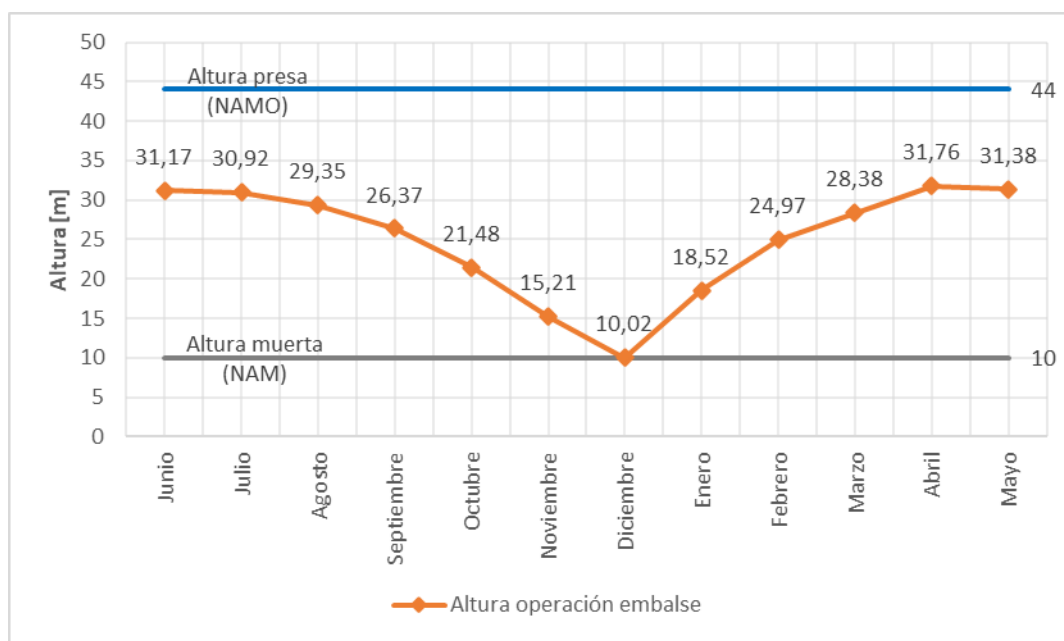
Tabla 4.50. Caudal de demanda por mes de nuevas áreas de cultivo: escenario 6.

Mes	Caudal demanda [l/s]
Junio	22,72
Julio	20,65
Agosto	165,88
Septiembre	328,9
Octubre	381,28
Noviembre	271,76
Diciembre	120,05
Enero	101,83
Febrero	164,39
Marzo	161,44
Abril	300,13
Mayo	53,22
Total=	2 092,25

Fuente: Elaboración propia.

La altura mínima y máxima alcanzada en este escenario es de 10,02 m y 31,76 m, respectivamente. Con la altura máxima se alcanza un volumen almacenado (incluyendo el volumen hasta el NAM) de 3 571 138,16 m³, que representa el 35,13% de la capacidad total del embalse “Sella – Rumicancha”.

Figura 4.57. Variación mensual de la altura de la presa: escenario 6.



Fuente: Elaboración Propia.

5. CAPÍTULO V : ANÁLISIS DE RESULTADOS.

5.1. Análisis Hidrológico.

Para el análisis hidrológico entre los caudales medios mensuales estimados por el estudio TESA y los generados mediante el modelo WEAP, "SellaQuebrada_1", se identifican diversos aspectos clave.

5.1.1. Precisión y estacionalidad del modelo WEAP desarrollado.

- **Consistencia estacional:** El modelo WEAP refleja adecuadamente los ciclos estacionales de la cuenca, con aumentos en caudales durante la temporada de lluvias (noviembre a marzo) y disminuciones progresivas en la época seca (abril a octubre). Esta precisión en la captura de patrones estacionales es fundamental para una gestión eficiente de los recursos hídricos en la cuenca, ya que permite prever las variaciones en la oferta hídrica y planificar la disponibilidad de agua de manera más acertada. Esta característica representa una ventaja clave del modelo WEAP en comparación con TESA (ver figura 4.20). también la cercanía de los valores de WEAP al promedio de la cuenca, documentada en el modelo Guadalquivir_3, respalda la representatividad del modelo WEAP en comparación con TESA (ver tabla 4.10).
- **Ajuste en periodos de baja oferta:** Durante los meses de menor precipitación (mayo a octubre), WEAP mantiene valores de caudal consistentes y bajos, en línea con estudios hidrológicos previos y observaciones de campo. Esto sugiere que el modelo WEAP tiene una correcta representación de los caudales base y de los flujos subterráneos, lo cual es especialmente útil para planificación en escenarios de sequía. Esta capacidad de WEAP para adaptarse a condiciones de baja oferta es un punto favorable que refuerza su aplicación en la planificación de almacenamiento y regulación en meses críticos (ver tabla 4.10).

5.1.2. Diferencias entre WEAP y TESA en la estimación de caudales mensuales.

- **Subestimación en algunos meses de temporada alta:** En algunos meses críticos (por ejemplo, enero y marzo), el modelo WEAP tiende a subestimar los caudales en comparación con los valores proyectados en TESA. Aunque esta subestimación pueda parecer una limitación, en el contexto de regulación de embalses, representa

un margen de seguridad valioso. Esto evita el riesgo de sobreestimar la oferta de agua y contribuye a diseñar infraestructuras más robustas y seguras para la cuenca alta del Guadalquivir. La subestimación en periodos de alta demanda es aceptable, ya que asegura la sostenibilidad del embalse.

- En términos generales, WEAP proporciona un ajuste más confiable en los caudales que el estudio TESA, especialmente en los meses de transición entre las estaciones húmeda y seca. Aunque WEAP puede no capturar completamente los picos más altos de la temporada húmeda, este margen de subestimación es ventajoso para la planificación de infraestructuras de almacenamiento, ya que evita el riesgo de sobreestimación en periodos críticos y ofrece una mayor seguridad en la regulación y manejo del embalse.
- Los escenarios de demanda de riego simulados en WEAP utilizan métodos de cálculo simplificados, como el coeficiente de cultivo, que ajustan la demanda en función de las condiciones locales de humedad y precipitación. En cambio, el modelo TESA emplea un enfoque generalizado en los coeficientes de distribución, lo cual podría sobreestimar o subestimar la oferta en algunos meses, comprometiendo la precisión en el cálculo de los volúmenes de aporte.

5.1.3. Errores y observaciones en el estudio TESA.

- **Error en el caudal específico:** El estudio TESA reporta un caudal específico de 6,61 l/s/km², lo cual representa una sobreestimación del 55% respecto a los valores reales observados de 3,70 l/s/km². Esta discrepancia puede causar una sobreestimación significativa en la oferta hídrica disponible para la cuenca y, por ende, influir negativamente en las proyecciones de caudales para la planificación. Este error subraya la importancia de reevaluar los datos base empleados en TESA y de considerar los caudales ajustados obtenidos mediante el modelo WEAP para mejorar la precisión en futuros estudios (ver tabla 3.7).
- **Uso de coeficientes de distribución fijos:** TESA utiliza coeficientes de distribución sin actualizaciones o adaptaciones a la variabilidad climática reciente. Esto podría limitar la precisión del modelo en años con patrones climáticos atípicos o en escenarios de cambio climático. En contraste, el modelo WEAP aplica una calibración iterativa basada en observaciones locales actualizadas, lo que refuerza su

aplicabilidad para la cuenca Rumicancha y otras, en condiciones actuales, brindando resultados más precisos y ajustados a la realidad.

5.2. Análisis de escenarios de regulación del embalse según la variabilidad en la oferta hídrica.

La evaluación de los escenarios de regulación del embalse "Sella – Rumicancha" demuestra cómo las diferentes combinaciones de infraestructura de trasvase y aducción impactan en la oferta hídrica disponible y la capacidad para cubrir demandas de riego y caudal ecológico. A continuación, se destacan las conclusiones generales basadas en el análisis de cada escenario.

Tabla 5.1. Comparación de aportes de los diferentes escenarios analizados.

Escenarios	Aportes [m³]				Total [m³]
	Rumicancha	Trasvase Chaupicancha	Trasvase Negro Muerto	Aducción Jarcas - Rumicancha	
Escenario 1	1 239 022,52				1 239 022,52
Escenario 2	1 239 022,52	2 042 496,00			3 281 518,52
Escenario 3	1 239 022,52		1 194 912,00		2 433 934,52
Escenario 4	1 239 022,52	2 042 496,00	1 194 912,00		4 476 430,52
Escenario 5	1 239 022,52	2 042 496,00	745 632,00		4 027 150,52
Escenario 6	1 239 022,52	2 042 496,00	745 632,00	263 520,00	4 290 670,52

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.2. Comparación de demandas cubiertas de los diferentes escenarios analizados.

Escenarios	Demandas			Áreas de riego [ha]	[%] respecto TESA
	Riego [m³]	Caudal ecológico [m³]	Total [m³]		
Escenario 1	1 609 087,68	123 902,25	1 732 989,93	259,35	9,10
Escenario 2	3 978 552,38	123 902,25	4 102 454,64	641,25	22,50
Escenario 3	2 988 307,30	123 902,25	3 112 209,55	481,65	16,90
Escenario 4	5 375 427,84	123 902,25	5 499 330,09	866,40	30,40
Escenario 5	4 845 004,42	123 902,25	4 968 906,67	780,90	27,40
Escenario 6	5 481 481,25	123 902,25	5 605 383,50	883,50	31,00

Fuente: Elaboración propia.

- **Escenario 1:** Este escenario depende únicamente del aporte de la subcuenca Rumicancha, con un área de riego limitada al 9.10% respecto al estudio TESA. Esto representa la capacidad mínima de operación del embalse y evidencia la necesidad de

infraestructura adicional para mejorar la seguridad hídrica en condiciones de baja precipitación.

- **Escenario 2:** Con el trasvase desde la subcuenca Chaupicancha, el embalse recibe un aporte significativamente mayor, permitiendo regar el 22.50% del área establecida en el TESA. Aunque este canal capta el volumen más alto de agua, es el trasvase más largo, lo cual podría implicar mayores costos de construcción y mantenimiento. Aun así, este escenario ofrece una mejora notable en la capacidad de regulación del embalse.
- **Escenario 3:** Este escenario incluye el trasvase de Negro Muerto, sin la construcción de la presa Jarcas, lo que permite captar también el flujo de la subcuenca Jarcas. Aunque el volumen total de aporte es menor que en el Escenario 2, la longitud del canal es más corta, lo cual puede hacerlo más viable económicamente. Este escenario riega el 16.90% del área en relación con TESA, proporcionando un equilibrio entre aporte hídrico y viabilidad económica.
- **Escenario 4:** Este es el escenario con el mayor volumen de aporte, al combinar los trasvases de Chaupicancha y Negro Muerto sin la presa Jarcas. Esto permite regar hasta el 30,40% del área establecida en el TESA, lo que representa el mayor porcentaje de cobertura de riego entre los escenarios analizados. Sin embargo, la no construcción de la presa Jarcas afecta negativamente a la producción de la zona al limitar las áreas de riego locales que podrían beneficiarse de dicha presa.
- **Escenario 5:** La inclusión de la presa Jarcas reduce el aporte directo al embalse por parte del trasvase de Negro Muerto, al retener parte del flujo. Este escenario, aunque tiene un volumen de aporte inferior al Escenario 4, permite regar el 27,40% del área según TESA.
- **Escenario 6:** Este escenario representa la máxima capacidad operativa, integrando todos los trasvases y el sistema de aducción Jarcas – Rumicancha. Aunque el aporte total es inferior al del Escenario 4, la construcción de la presa Jarcas permite un control estratégico del caudal, lo que permite regar el 31% del área TESA, lo cual maximiza la cobertura de riego. Sin embargo, la necesidad de construir la presa Jarcas y el sistema de aducción puede hacer que este escenario sea económicamente inviable, aunque hidrológicamente óptimo.

A continuación, se presenta un análisis de los niveles mínimos y máximos alcanzados para cada escenario en relación con la capacidad operativa del embalse "Sella – Rumicancha." Este análisis se centra en la comparación de los volúmenes almacenados y la capacidad efectiva del embalse en cada escenario, tomando en cuenta que el volumen útil es de 10 164 946,78 m³ y el volumen muerto es de 69 913,09 m³. La altura hasta el NAMO es de 44 m, hasta el nivel NAM de 10 m, teniendo una altura útil de 34 m.

Tabla 5.3. Comparación de los niveles mínimos alcanzados en cada escenario.

Escenarios	Nivel mínimo alcanzado			
	Altura [m]	Volumen almacenado [m ³]	Capacidad del embalse [%]	Volumen útil alcanzado [m ³]
Escenario 1	10,14	75 669,16	0,74	5 756,06
Escenario 2	10,16	76 221,48	0,75	6 308,39
Escenario 3	10,22	78 894,96	0,78	8 981,86
Escenario 4	10,03	71 073,10	0,70	1 160,01
Escenario 5	10,16	76 556,82	0,75	6 643,73
Escenario 6	10,02	70 673,51	0,70	760,42

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.4. Comparación de los niveles máximos alcanzados en cada escenario.

Escenarios	Nivel máximo alcanzado			
	Altura [m]	Volumen [m ³]	Capacidad del embalse [%]	Volumen útil alcanzado [m ³]
Escenario 1	21,63	1 142 482,11	11,24	1 072 569,01
Escenario 2	29,34	2 801 590,31	27,56	2 731 677,21
Escenario 3	26,69	2 113 236,27	20,79	2 043 323,17
Escenario 4	32,32	3 773 467,01	37,12	3 703 553,92
Escenario 5	31,29	3 408 685,96	33,53	3 338 772,87
Escenario 6	31,76	3 571 138,16	35,13	3 501 225,07

Fuente: Elaboración propia.

Los niveles mínimos alcanzados en cada escenario reflejan una situación de alta vulnerabilidad para el embalse en términos de reserva hídrica durante periodos de baja oferta. A pesar de las diferencias entre escenarios, ninguno de ellos logra alcanzar un volumen mínimo que proporcione una reserva adecuada para cubrir consistentemente las demandas de riego y caudal ecológico en situaciones de extrema sequía. Los volúmenes útiles mínimos se

mantienen en niveles bajos en todos los casos, con un porcentaje menor al 1% de la capacidad total del embalse, lo que limita la operatividad y sostenibilidad del sistema en condiciones críticas.

Los volúmenes útiles en los máximos niveles alcanzados en cada escenario es que, aunque se incrementa el volumen almacenado, este sigue siendo bajo en comparación con la capacidad máxima de almacenamiento útil del embalse de 10,164,946 m³. A pesar de que algunos escenarios logran optimizar el aporte hídrico mediante trasvases y aducción, el volumen útil alcanzado sigue siendo limitado, sin aprovechar plenamente el potencial de almacenamiento del embalse.

En conclusión, se puede destacar lo siguiente:

- **Viabilidad económica:** La construcción de la presa Jarcas y el sistema de aducción Jarcas – Rumicancha, propuesto en el escenario 6, representan una inversión significativa. Aunque estos elementos proporcionan una mayor capacidad de regulación hídrica y aumentan la disponibilidad de agua para riego, su viabilidad económica es cuestionable debido al alto costo. Esto plantea la necesidad de evaluar si los beneficios en términos de regulación y riego justifican la inversión requerida.
- **Compromiso entre aporte y costos:** El Escenario 4, que combina los trasvases de Chaupicancha y Negro Muerto sin la construcción de la presa Jarcas, surge como una alternativa que equilibra la maximización de la oferta hídrica con la viabilidad económica. Este escenario permite captar un mayor volumen de agua directo al embalse, lo que maximiza el área de riego sin incurrir en los elevados costos de la presa Jarcas. Sin embargo, esta opción también significa renunciar al potencial de producción en la cuenca Jarcas, ya que el agua no se almacenaría en una presa local.
- **Optimización del riego:** La capacidad de riego es una variable fundamental para evaluar la efectividad de los escenarios. El estudio TESA contempla un área de riego de 2 850 hectáreas, y los diferentes escenarios logran cubrir porcentajes variables de esta superficie. En este sentido, el Escenario 6 es el que más se acerca a la meta establecida por TESA, con una cobertura del 31,00%. Sin embargo, este porcentaje sigue siendo bajo en relación con el objetivo total, lo cual indica que, aun con la infraestructura más completa y costosa, no se logra alcanzar plenamente la meta de

riego propuesta. Por otro lado, el escenario 4 también logra un área considerable de riego (30,40%), convirtiéndose en una opción más económica, aunque su cobertura sigue siendo limitada en comparación con las expectativas de TESA. Esto destaca la necesidad de considerar estrategias complementarias o ajustes en la gestión hídrica para acercarse más al área de riego deseada.

En términos de balance entre viabilidad económica y eficacia operativa, el Escenario 4 se destaca como la opción más equilibrada. Este escenario maximiza la oferta hídrica sin incurrir en los altos costos asociados a la construcción de la presa Jarcas, permitiendo un aprovechamiento significativo del recurso hídrico y logrando una cobertura de riego cercana al 30% del área proyectada en el estudio TESA. Aun así, esta cobertura es limitada en comparación con los objetivos iniciales, lo cual subraya la restricción en el alcance de riego sin infraestructura adicional.

Por otro lado, si el presupuesto permite una inversión más ambiciosa y la prioridad es asegurar la máxima sostenibilidad hídrica a largo plazo con la mayor cobertura de riego posible, el Escenario 6 sigue siendo la opción más robusta y alineada con los objetivos originales del proyecto, ofreciendo la mayor capacidad de regulación y una cobertura del 31%. Sin embargo, esta cobertura sigue siendo modesta en relación al área de riego total planificada.

Este análisis destaca la necesidad de una evaluación exhaustiva de las inversiones en infraestructura hídrica, considerando tanto los costos inmediatos como los beneficios en seguridad hídrica, cobertura de riego, y sostenibilidad regional. La decisión final debe equilibrar el presupuesto disponible con los objetivos de gestión hídrica a largo plazo para maximizar el impacto y la resiliencia del sistema hídrico de la región.

6. CAPÍTULO VI : CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

6.1. Conclusiones.

1) Diagnóstico de Aportes y Trasvases propuestos por el estudio TESA en comparación con los resultados estimados en el presente proyecto.

El análisis del modelo WEAP desarrollado para este estudio evidencia que los caudales disponibles son menores que los calculados por TESA. Esta discrepancia se hace más evidente en escenarios críticos (años secos), donde la capacidad de regulación del embalse es insuficiente para cubrir las demandas de riego. Al utilizar los valores corregidos de caudal específico y ajustar los coeficientes de distribución, se demuestra que el embalse, con o sin el apoyo de los trasvases, difícilmente alcanzaría los niveles de almacenamiento necesarios en condiciones de baja precipitación.

El estudio TESA basa sus cálculos en coeficientes de distribución provenientes de estudios previos, sin realizar ajustes significativos para las condiciones locales de la cuenca Rumicancha. Esto limita la precisión del cálculo para escenarios de variabilidad climática actual, ya que los caudales estimados no reflejan adecuadamente las fluctuaciones anuales de precipitación y caudal, además, esta metodología no toma en cuenta otros factores como tipos de suelos, cobertura vegetal y demandas, como si lo hace el modelo WEAP.

Esta limitación operativa resalta la necesidad de reevaluar los escenarios de oferta hídrica planteados en TESA, que se basan en datos que no se ajustan a las condiciones hidrológicas observadas. Con un diagnóstico basado en caudales observados y ajustes adecuados, el modelo WEAP "SellaQuebrada_1" proporciona una representación más realista, al incluir datos de 40 años (1980 – 2020) de volúmenes de aporte.

En conclusión, el diagnóstico de los aportes y trasvases, con énfasis en las observaciones realizadas al estudio TESA, muestra que la capacidad de regulación y llenado del embalse está limitada por datos iniciales sobreestimados en el estudio TESA. La sobreestimación del caudal específico y el uso de coeficientes de distribución inadecuados han generado una percepción errónea de la capacidad del embalse para cubrir demandas de riego de manera sostenible.

La corrección de estos errores en el modelo "SellaQuebrada_1" indica que, si bien los trasvases Chaupicancha, Negro Muerto y el sistema de aducción "Jarcas – Rumicancha" mejoran significativamente el volumen aprovechable, la operación efectiva del embalse depende de una reevaluación de la oferta hídrica bajo condiciones realistas. Estos hallazgos subrayan la importancia de una regulación basada en datos ajustados y en un análisis cuidadoso de la oferta y demanda hídrica de la cuenca, para maximizar la operatividad del embalse en distintos escenarios de oferta.

2) Desarrollo del modelo "SellaQuebrada_1" y su eficacia en la regulación del embalse.

Se destaca dos aspectos:

- La información de base proporcionada por el modelo WEAP "Guadalquivir_3" ha sido clave para construir el modelo "SellaQuebrada_1", permitiendo una personalización detallada que se ajusta a las particularidades de las subcuencas estudiadas. Al utilizar datos de demanda hídrica, condiciones climáticas, tipos de uso de suelo y registros hidrométricos específicos, se ha logrado desarrollar un modelo que refleja con mayor precisión las características y dinámicas de cada subcuenca en relación al embalse.
- Esta personalización incluye la discretización de unidades hidrológicas que optimiza el análisis de las fuentes de agua y permite identificar con mayor precisión las variaciones en los caudales aportados por cada subcuenca. La segmentación hidrológica facilita un control más detallado sobre la contribución de cada área de aporte al embalse. La personalización del modelo también ha facilitado el análisis de las demandas de agua agrícola, permitiendo realizar proyecciones en función de la variabilidad del mismo. Esto refuerza la capacidad del modelo desarrollado para adaptarse a cambios en la demanda sin comprometer la sostenibilidad del recurso hídrico en la cuenca.

El desarrollo del modelo "SellaQuebrada_1" basado en la información del modelo WEAP "Guadalquivir_3" ha permitido una adaptación efectiva de los datos climáticos, hidrométricos, de uso de suelo y de demanda, logrando una evaluación precisa y detallada de las subcuencas de aporte al embalse. Este enfoque ha facilitado la simulación de diversos

escenarios hídricos, demostrando cómo los aportes de las subcuencas, ajustados a condiciones realistas, impactan directamente en la capacidad operativa y de regulación del embalse “Sella – Rumicancha”. En última instancia, esta personalización ha sido crucial para validar la sostenibilidad del embalse en escenarios de oferta limitada, reforzando la utilidad del modelo en la planificación y gestión a largo plazo del recurso hídrico en la cuenca alta del Guadalquivir.

Además, para garantizar la confiabilidad y la verificación del desempeño de los diferentes escenarios bajo condiciones críticas, los aportes hídricos estimados por el modelo desarrollado serán ajustados a una persistencia del 75%, la cual representa las condiciones hidrológicas de un año seco, según los lineamientos técnicos recomendados por el MMAyA y VRHR.

3) Eficiencia en la gestión del volumen actual disponible en el embalse “Sella – Rumicancha”.

Para el análisis del embalse “Sella – Rumicancha” en su estado actual, correspondiente al Escenario 1, se han evaluado las variaciones mensuales de la oferta total, que se determinan en función de las aportaciones propias de la cuenca y del volumen sobrante de cada mes anterior. Este escenario refleja la operación del embalse en ausencia de trasvases adicionales y representa una visión de la capacidad de regulación y suministro bajo condiciones actuales. A continuación, se presenta un análisis en el supuesto que se decide operar manteniendo el calendario agrícola propuesto por el estudio TESA.

- La oferta mensual se compone de los aportes propios de la cuenca más el volumen sobrante del mes previo, lo cual permite que en meses con menores aportaciones naturales se cuente con un respaldo de agua almacenada. Sin embargo, se observa una tendencia decreciente en el volumen sobrante conforme avanza la temporada seca, lo cual refleja una disminución en la oferta total disponible en meses críticos como octubre y noviembre (ver Tabla 4.27 y Figura 4.33).
- Con base en la oferta y el volumen aprovechable, las áreas de riego calculadas alcanzan una cobertura del 9,1% respecto a la superficie propuesta en el estudio TESA. Esta baja cobertura indica que, sin trasvases adicionales, el embalse en su estado actual es incapaz de satisfacer las demandas de riego proyectadas para la

región, afectando la sostenibilidad de las actividades agrícolas dependientes de este recurso (ver Tabla 4.29).

- La altura de operación del embalse muestra variaciones a lo largo del año, alcanzando un mínimo de 10,14 m y un máximo de 21,63 m en abril. Esto implica que el embalse solo alcanza el 11,24% de su capacidad máxima (NAMO) en el periodo de mayor almacenamiento, lo cual evidencia una limitación importante en la capacidad de regulación del embalse para asegurar una disponibilidad constante en el tiempo (ver Figura 4.35).

La operación actual del embalse, en condiciones críticas (año seco con 75% de persistencia), presentara limitaciones significativas en términos de regulación y aprovechamiento hídrico. La dependencia exclusiva de los aportes propios de la cuenca resulta en una oferta hídrica insuficiente para satisfacer las demandas de riego y ecológicas en los meses críticos, y la cobertura de riego proyectada es muy baja (apenas el 9,1% de lo estimado por el TESA). Esto evidencia la necesidad de infraestructura adicional, como trasvases o mejoras en la capacidad de almacenamiento, para mejorar la sostenibilidad hídrica del embalse y reducir su vulnerabilidad en escenarios de sequía.

4) Simulación en condiciones críticas y análisis de trasvases.

Los resultados de la simulación en un año seco demuestran que los trasvases incrementan significativamente la sostenibilidad y capacidad operativa del embalse “Sella – Rumicancha”, permitiendo que se mantenga una oferta hídrica más constante y que se satisfagan parcialmente las demandas de riego y caudal ecológico, especialmente en los escenarios que combinan múltiples trasvases.

Sin embargo, la máxima cobertura de riego alcanzada (31% en el escenario 6) sigue siendo considerablemente baja en comparación con el área proyectada por el TESA. Esto subraya la necesidad de una evaluación detallada entre el costo y el beneficio de los trasvases y la infraestructura adicional, en particular, la viabilidad económica de la presa Jarcas y el sistema de aducción. El Escenario 4 emerge como una opción balanceada que maximiza el aporte sin incurrir en los altos costos asociados con la presa Jarcas y el sistema de aducción, proporcionando una mayor sostenibilidad del embalse en condiciones críticas sin afectar significativamente la economía del proyecto.

6.2. Recomendaciones.

- Para mejorar la precisión y robustez del modelo WEAP “SellaQuebrada_1”, se recomienda conseguir una base de datos hidrométricos más sólida, idealmente con registros a nivel diario. Esto permitiría capturar mejor la variabilidad de caudales y responder con mayor exactitud a eventos hidrológicos extremos, como picos de caudal en época de lluvias o caudales mínimos en periodos secos. Esta base de datos permitirá validar observaciones realizadas en el presente estudio.
- Dado el alto costo de la construcción de nuevas infraestructuras como la presa Jarcas, es esencial explorar estrategias de optimización que permitan maximizar el uso de las estructuras actuales. Esto podría incluir la implementación de técnicas de gestión adaptativa del embalse, donde las operaciones se ajusten en función de las variaciones estacionales y de los cambios observados en las condiciones climáticas.
- Dado que la cobertura de riego proyectada en los escenarios aún está por debajo del 31%, un análisis más detallado de las áreas agrícolas con potencial de expansión de riego es fundamental. Esto podría incluir estudios sobre el tipo de cultivo, eficiencia de riego y técnicas de conservación de agua para maximizar el uso del recurso sin necesidad de aumentar significativamente el caudal derivado. También se sugiere una revaluación del calendario agrícola basado en la actualidad del desarrollo de la actividad agrícola.
- Aunque el enfoque principal de WEAP en este proyecto es el balance hídrico, añadir variables de calidad de agua podría ser valioso en el futuro, especialmente si se prevén actividades agrícolas o industriales que afecten la cuenca. Esto permitiría prever cómo los cambios en la calidad del agua pueden influir en el uso de los recursos del embalse.
- Escenarios de crecimiento poblacional y expansión agrícola: Incorporar proyecciones de crecimiento poblacional y expansión de áreas de riego para evaluar cómo estos factores influirían en la demanda de agua y en la capacidad de regulación del embalse en el largo plazo.