

2022

Balance Hídrico del Parque Nacional Madidi

Proyecto de Transición



ESTADO PLURINACIONAL DE
BOLIVIA

MINISTERIO DE
MEDIO AMBIENTE Y AGUA

SEI Stockholm
Environment
Institute

 Suecia
Sverige

Créditos

Autores

Angie Tatiana Forero Hernandez
Gustavo Ayala Ticona

SEI Latinoamerica

Coordinadora

Marisa Escobar

SEI US

La Paz – Bolivia
Noviembre 2022

Proyecto de Transición en Apoyo a la
implementación de Políticas Sectoriales y PPRH



Contenido

1.	Introducción.....	3
2.	Área de estudio	5
3.	Datos de entrada.....	6
4.	Calibración de la hidrología.....	8
5.	Balance Hídrico	16
6.	Análisis	24
7.	Siguientes pasos y recomendaciones.....	24
8.	Referencias	25

Balance Hídrico del Parque Nacional Madidi

1. Introducción

El Parque Nacional Madidi [PNM], es parte del sistema amazónico, el cual constituye la cabecera de cuenca en la margen occidental del territorio boliviano y el continente (ver [Figura 1](#)). Los cambios en la cobertura en este tipo de ecosistemas son una preocupación latente debido a la gran biodiversidad endémica que contienen, y por los importantes roles de sus funciones ambientales como fuente de recursos hídricos, regulador climático, así como medio para secuestro de carbón¹.



Figura 1. Localización del PNM en el contexto continental [Fuente: MMAyA, 2018].

¹ Salati, E., & Nobre, C. A. (1991). Possible climatic impacts of tropical deforestation. In *Tropical forests and climate* (pp. 177-196). Springer, Dordrecht.

El PNM tiene un rango que cubre desde la cordillera de los Andes hasta la cuenca del Amazonas en un área de 50 000 km² distribuida en múltiples jurisdicciones. Es núcleo de algunos de los niveles más altos de endemismo y número de especies en peligro incluyendo al oso de anteojos [*Tremarctos ornatus*], vicuña [*Vicugna vicugna*], cóndor andino [*Vultur gryphus*], jaguar [*Panthera onca*], nutria gigante de río [*Pteronura brasiliensis*] y pecarí [*Tayassu pecari*]².

Los asentamientos humanos han jugado un papel importante en el desarrollo y dinámica eco sistemática del **PNM**, considerando a la data de los asentamientos [preincaico] la complejidad de la interacción de hábitos y costumbres de las comunidades con el uso de la tierra y las dependencias con los recursos naturales con piezas fundamentales del equilibrio establecido en los hábitats presentes en la región³. Si bien en la actualidad se mantienen procesos de conservación en la biodiversidad, existen varios desafíos en la manutención del área, debido a la evolución del uso actual del suelo, el mismo se ha diversificado en extracción industrial de recursos [minería específicamente, así como madera], agricultura, turismo, manejos comunales que como tendencia general van incrementando lo que contrapone necesidades ecosistemas relacionadas con proceso de recuperación, esto en recursos estratégicos como los suelos, la flora así como el agua. En 2020 Wildlife Conservation Society [**WCS**], cumplió más de 20 años de trabajos en el **PNM**, en diferentes ámbitos, ello ha ayudado a identificar una diversidad de retos, entre los cuales podemos mencionar los siguiente: 1) los ecosistemas actualmente presentan perdida generalizada de sus capacidades hídricas de recarga, 2) existe un procesos sostenido de incremento en procesos de contaminación minera debido a las actividades industriales establecidas desde hace ya unas décadas, 3) no se cuenta con información que permita mapear zonas de recarga para establecer acciones de protección a factores correlacionados como el área de bosque, esto afecta zonas aferentes en las serranías de las Tierras Comunitarias de Origen [**TCO**] como Tacanas los que requieren de diagnósticos en temas de saneamiento dada la tendencia de contaminación de sus fuentes, 4) análisis de balance hidrológico en las cuencas del **PNM** son esenciales así como evaluación de calidad de aguas que permita clasificar los ríos de la región, para su manejo y apoyo a las comunidades en la selección de fuentes de abastecimiento sin riesgos, los cuales debido al tipo de contaminación predominantes en la región [mercurio], presentan secuelas en el largo plazo las cuales son difíciles de detectar de forma temprana lo que pone en peligro la dinámica futura de las comunidades y el medio ambiente endémicos del parque.

² Coppolillo, P., Gomez, H., Maisels, F., & Wallace, R. (2004). Selection criteria for suites of landscape species as a basis for site-based conservation. *Biological Conservation*, 115(3), 419-430.

³ Silva, R., Robison, D., McKean, S., & Álvarez, P. (2002). La historia de la ocupación del espacio y el uso de los recursos en el PNANMI Madidi y su zona de influencia. WCS-CARE and the European Community, La Paz, Bolivia

Como apoyo al Gobierno Nacional Boliviano para afrontar los desafíos y problemáticas previamente descritas el Stockholm Environment Institute [SEI] ha elaborado el presente reporte que inicia la línea de evaluación hídrica necesaria para las cuencas del PNM, de forma tal de brindar información preliminar sobre los recursos hídricos de cuatro unidades hidrográficas, recomendadas para su intervención por parte de WCS (Tuichi, Hondo, Madidi, Quendeque), el estudio hace uso de la información y reportes generados en el contexto del Balance Hídrico Superficial de Bolivia [BHSB] desarrollado por SEI en el año 2018, para el Ministerio de Medio Ambiente y Agua [MMAyA].

2. Área de estudio

El Parque Nacional Madidi es parte del sistema hídrico de la macrocuenca del río Amazonas, la mayor en extensión a nivel mundial, la cual constituye unos 6.3 millones de Km², siendo el 35% del continente sudamericano⁴. A nivel nacional el parque está localizado en la cuenca del río Beni, en la región Los Yungas en la frontera con Perú. El área total de la cuenca donde se localiza el Parque Nacional Madidi consta de 25 354 km², divididos en cuatro unidades hidrográficas correspondientes a los ríos Quendeque, Hondo, Tuichi y Madidi; sus principales características se presentan en la [Tabla 1](#). El área de estudio se presenta en la [Figura 2](#).

Característica	Tuichi	Hondo	Madidi	Quendeque
Área (km ²)	9570.59	1706.40	12603.82	1473.51
Población aproximada	7771	124	1119	64
Municipalidades principales	Apolo, Curva, Ixiamas, Pelechuco, San Buenaventura	Apolo	Ixiamas	San Buenaventura, Apolo
Principales comunidades indígenas	Marka Cololo Copacabana Antaquilla, San José de Uchupiamonas	Lecos de Apolo	San José de Uchupiamonas	Lecos de Apolo
Conflicto	Conflictos mineros			

Tabla 1 Características de las unidades hidrográficas (Fuente: WCS, 2022)

⁴ Goulding, M., Barthem, R., & Ferreira, E. J. G. (2003). The Smithsonian atlas of the Amazon

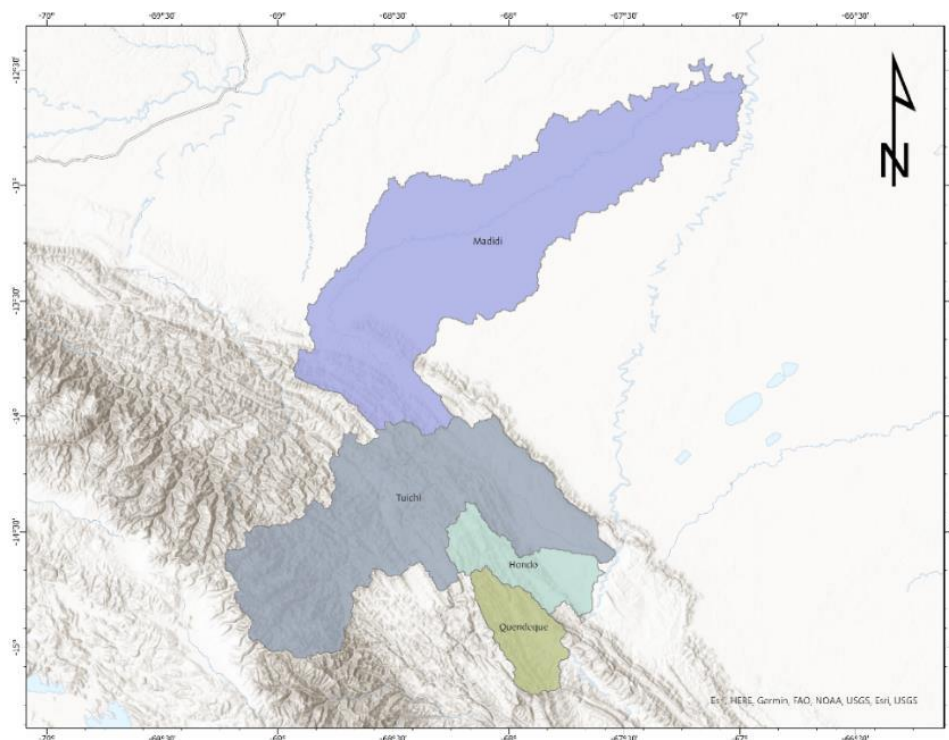


Figura 2 Área de estudio (Fuente: Elaboración propia).

3. Datos de entrada

La representación espacial de la precipitación en la cuenca presenta varios desafíos, el primero relacionado con la representatividad de la ubicación de las estaciones, y el segundo sobre las influencias atmosféricas regionales [Amazonia/Andes] que condicionan una relación entre la precipitación y factores locales como la elevación.

Para el modelo del PNM se utilizó la información producida para el estudio del Balance Hídrico Superficial de Bolivia [BHSB]⁵ de 2018. En el caso de la precipitación se contrastaron los datos de precipitación a nivel de unidades hidrográficas (1980 – 2015) con los datos observados reportados por el Observatorio HYBAM (Amazon Basin Water Resources Observation Service) en el periodo común 1980 - 2009. Los registros de caudales en las estaciones Rurrenabaque y Peña Amarilla usados para la calibración posterior fueron proporcionados por SENAHMI.

⁵ <https://datos.siarh.gob.bo/biblioteca/406>

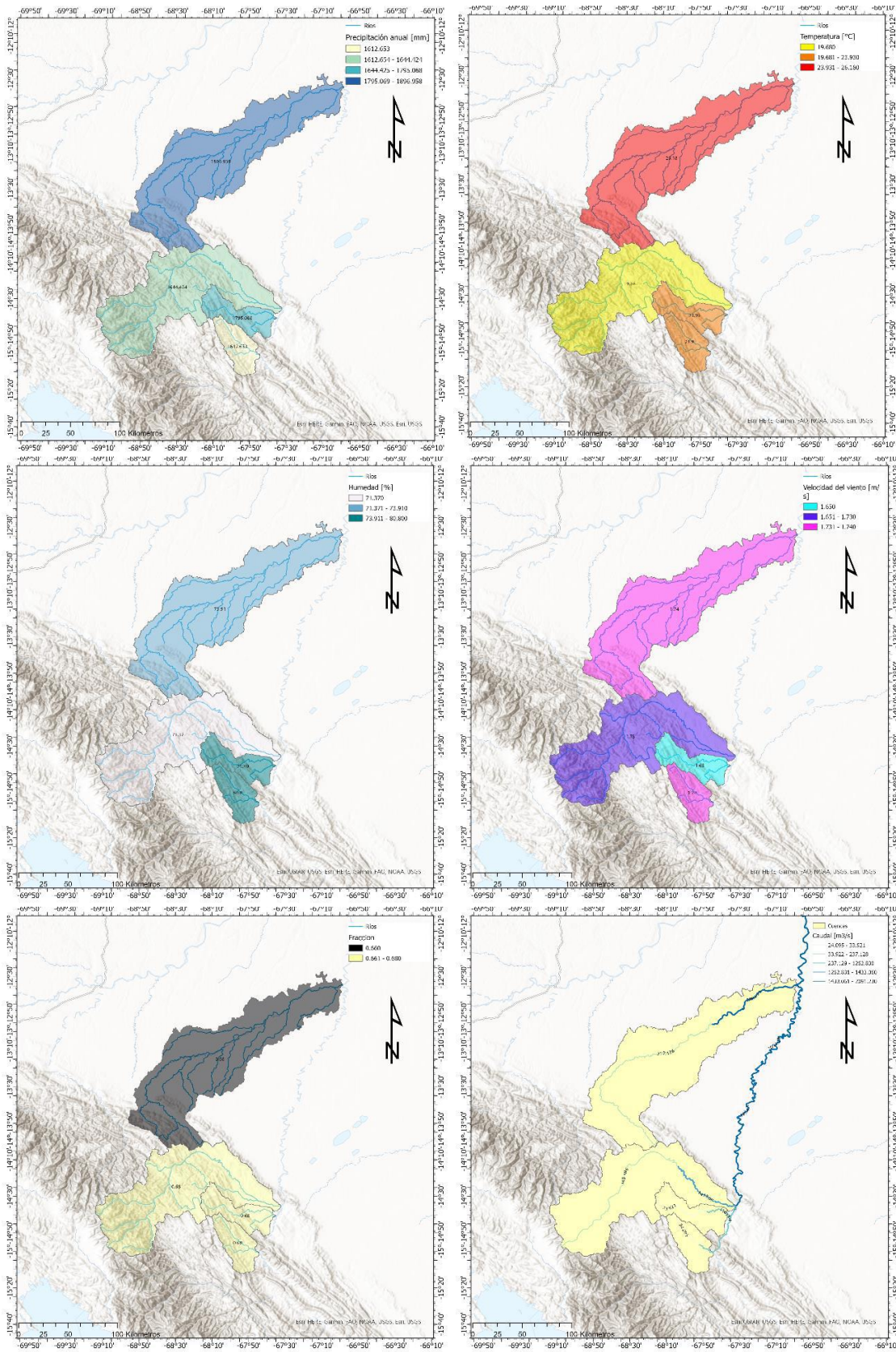


Figura 3 Datos de entrada al modelo WEAP: Precipitación, Temperatura, Humedad, Velocidad del viento, Fracción de nubosidad y resultado de caudales (Fuente: Elaboración propia).

4. Calibración de la hidrología

El modelo hidrológico utilizado para representar las cuencas en el PNM, es a través del método de humedad de suelo [SMM, por sus siglas en inglés], disponible en WEAP y que permite representar de forma semi distribuida la dinámica del agua en suelo, el subsuelo y la zona subterránea⁶. Para aplicar el modelo, es necesario contar con información de textura de suelo y cobertura vegetal, en el caso del estudio de BHSB [2018], estas bases de datos provienen de los reportes de la Agencia Espacial Europea [ESA] para su base de datos CCI-LC para el mapeo de 2010⁷ y de la base de datos de suelos de FAO, Harmonized World Soil Database⁸, para vegetación y suelo respectivamente. La Figura 4 muestra esta base de datos en el contexto de las cuencas del PNM.

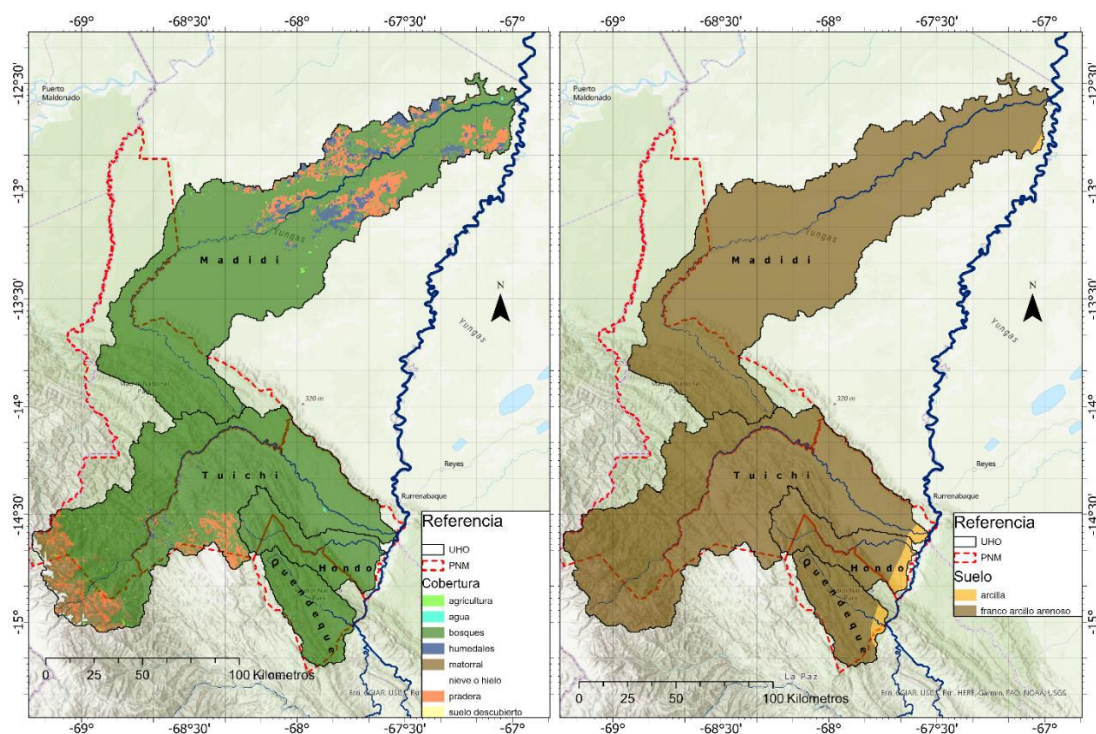


Figura 4 Suelo y Cobertura para el área del PNM (Fuente: BHSB, 2018)

Para el análisis hidrológico es altamente importante es contar con una evaluación completa de la evolución superficial de la vegetación. El PNM cuenta con estudios que hacen mapeos del cambio de uso de suelo y la vegetación predominante en las cuencas [el bosque constituye el 88% de la superficie analizada (22 220 km² de los 25 381 km² totales

⁶ https://www.weap21.org/WebHelp/Two-bucket_Method.htm

⁷ Bontemps, S., Defourny, P., Radoux, J., Van Bogaert, E., Lamarche, C., Achard, F., ... & Arino, O. (2013, September). Consistent global land cover maps for climate modelling communities: current achievements of the ESA's land cover CCI. In Proceedings of the ESA living planet symposium, Edimburgh (Vol. 13, pp. 9-13).

⁸ Wieder, W. R., Boehner, J., Bonan, G. B., & Langseth, M. (2014). Regridged harmonized world soil database v1. 2. ORNL DAAC.

del área estudiada)]. El análisis descrito por Forrest, J. L., et al., (2008)⁹, describe una medida fortaleza y dinámica regulación en protección correlacionada con las tasas de deforestación y cambio en el uso del suelo en la **PNM**, reportando que las zonas manejadas por el Servicio Nacional de Áreas Protegidas [SERNAP], presentan incrementos en la cobertura boscosa, las áreas manejadas por **TCOs** un cambio mínimo, mientras que las demás zonas colindantes al **PNM** muestran reducción del área de bosque significativas.

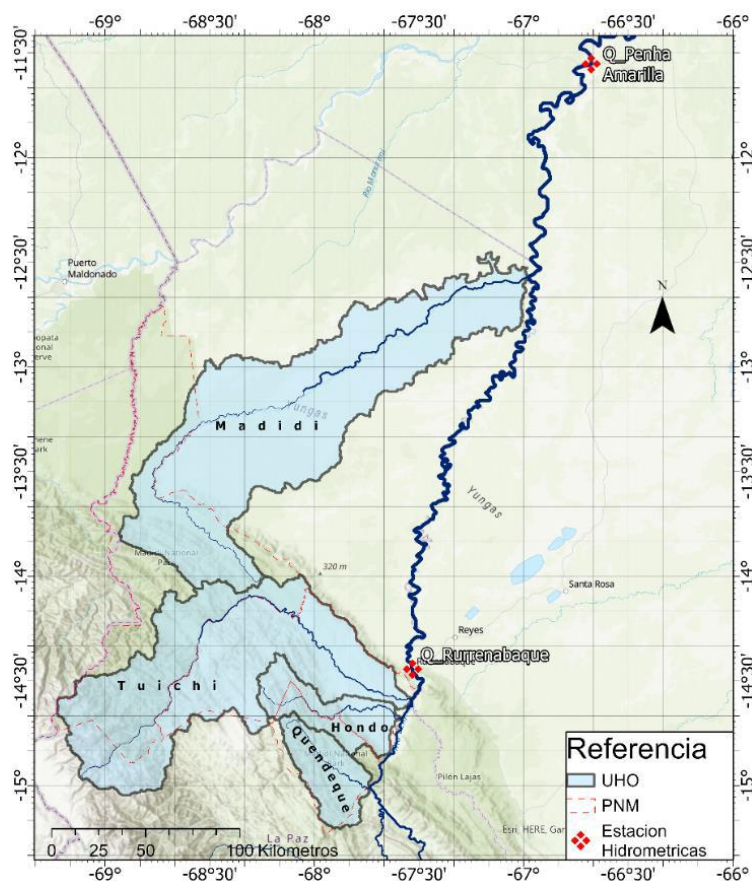


Figura 5 Estaciones Hidrométricas usadas en la calibración hidrológica (Fuente: BHSB, 2018)

En el caso del área de las cuencas estudiadas, Madidi presenta su zona norte fuera del **PNM** sin embargo está en jurisdicción de la **TOC** de los Tacanas, en el caso de Hondo y Tuichi, existen registros de degradación boscosa y pérdida de población en flora y fauna producto de una década de tala selectiva⁹ antes de la declaratoria de Parque Nacional del **PNM**, producto de la proximidad del río Beni [ruta fluvial utilizada en la región]. El análisis previo ha sido enfocado entre los años 2000 a 2008, lo que implica que se debería realizarse un análisis nuevo para la última década, y verificar que estos patrones neutros de cambio en el PNM siguen esta misma tendencia o por el contrario ha habido cambios en la tendencia.

⁹ Forrest, J. L., Sanderson, E. W., Wallace, R., Lazzo, T. M. S., Cerveró, L. H. G., & Coppolillo, P. (2008). Patterns of land cover change in and around Madidi National Park, Bolivia. *Biotropica*, 40(3), 285-294.

En el presente estudio utiliza la cobertura clasificada para 2010, con los siguientes resultados respecto de las propiedades hidrológicas producto del proceso de calibración en dos puntos de control hidrométricos localizados en el río Beni, el primer en Rurrenabaque y el otro a la salida del río Beni en Peña Amarilla (Figura 5). La hidrología simulada en este reporte considerando la ubicación de las estaciones hidrométricas representan la respuesta hidrológica en el río Beni, con los aportes de Madidi, Hondo, Tuichi y Quendeque, pero también de todo el complejo de aportantes provenientes de la los Yungas en el departamento de La Paz, lo que implica que los sesgos descritos en esta sección deben ser generalizados a toda la zona de aporte, y que la única forma de minimizarlos sería instalando nuevos puntos de monitoreo que permitan establecer patrones particulares que la representación del complejo suelo/cobertura descrito no captura en estas cuenca de llanura amazónica, lo cual por la experiencia del desarrollo del balance hídrico en la amazonia en general presenta varias particularidades, desde interacción con macro zonas afloramiento subterráneo, procesos de atenuación debido a llanuras de inundación entre otras que puede generar comportamientos únicos en cada uno de los aportantes al Río Beni.

Parámetro	Madidi	Tuichi/Hondo/Quendeque
Dw [mm]	1000	800
kd [mm/mes]	60	80
F [adimensional]	0.29	0.35

Tipo de Suelos	Ks [mm/mes]
Franco arcillo arenoso	64.8
Arcilla	14.4

Cobertura	RRF [adimensional]
Bosques	6
Humedales	10
Agricultura	4
Pradera	3
Matorral	4
Suelo descubierto	3
Nieve o hielo	5
Bosques	9
Agricultura	5
Pradera	6

Suelo/Cobertura	Sw [mm]
Franco arcillo arenoso/bosques	195-260
Franco arcillo arenoso/humedales	130-260
Arcilla/bosques	180-240
Franco arcillo arenoso/agricultura	130-195

Franco arcillo arenoso/pradera	65-130
Franco arcillo arenoso/matorral	130
Franco arcillo arenoso/suelo descubierto	65
Franco arcillo arenoso/nieve o hielo	13
Arcilla/humedales	240
Arcilla/pradera	120

Tabla 2 Parámetros Hidrológicos para las cuencas del PNM (Fuente: BHSB, 2018)

Existen dos tipos de suelo en la región, el predominante es el franco arcillo arenoso, relacionado con las zona altas y medias, y en menor proporción arcilla pura en la zona riverense del río Beni. Las propiedades de conductividad en el subsuelo son dinámicas en la zona alta y media de las cuencas [64.8 mm/mes], aspecto que disminuye una vez que el Inter flujo pasa a la zona baja [14.4 mm/mes]. En el caso de parámetros subterráneas producto de la calibración en la parte baja del sistema de cuencas, se ha determinado que el 35% del agua infiltrada en el caso de Hondo, Tuichi, y Quendeque permanece susceptible de escurrir en subsuelo, esto disminuye en el caso de Madidi al 29%, dado que esta cuenca se desarrolla en un área más extense en la llanura amazónica en comparación con las demás (ver [Tabla 2](#)).

En aspectos de capacidad hidrológica de complejo suelo/cobertura en las cuencas del **PNM**, se identifica que el complejo con mayor capacidad de retención de agua es el bosque sobre suelo

franco arcillo arenoso, con una capacidad que oscila entre los 195 a los 260 [mm], el segundo complejo está relacionado con los humedales localizados en las zonas bajas de Madidi (130 a 260 [mm]). El resto oscilan entre los 13 a los 195 [mm], por otra parte, la caracterización de la resistencia de las cuenca a la escorrentía directa en superficie, se ha obtenido que la cobertura con mayor densidad de vegetación son los humedales en la región baja de Madidi [la retención en superficie es total al punto de estancamiento en estas coberturas, el valor 10 representa ese estado en la [Tabla 2](#)], esto se debe mayormente a la condición de pendiente mínima lo que incluso genera el comportamiento meándrico del cauce lo que es altamente complejo de monitorear dado el cambio errático de la ubicación del cauce con la sola aparición de un evento extremo, el detalle de los parámetros y su distribución espacial son presentados en la [Figura 6](#).

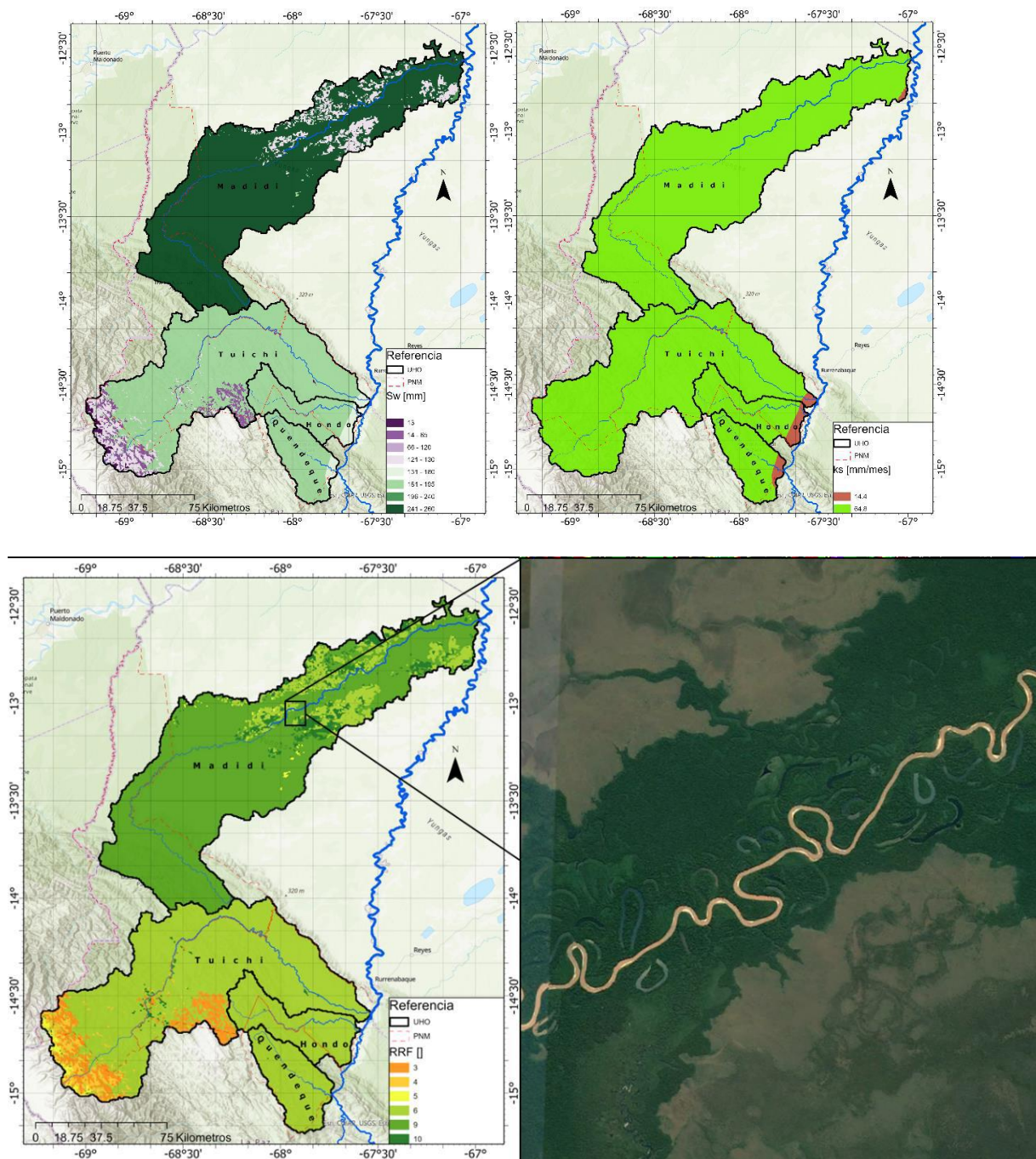


Figura 6 Parámetros hidrológicos en las cuencas del PNM (Fuente: BHSB, Google Earth 2018)

El proceso de calibración del modelo cuenta con información hidrométrica disponible en casi 36 años de registros en el caso de Rurrenabaque, en el caso de Peña Amarilla, solo 11 [entre 2004 a 2015]. Después del análisis climático y los patrones interanuales de la precipitación, no se puede identificar un cambio a nivel de las décadas entre 1980 a 2015, por ello se decidió trabajar en la calibración en el periodo en el cual ambas estaciones cuentan con datos tanto Rurrenabaque como Peñas Amarillas, los resultados son reportados en la Figura 7, a nivel de la comparativa en los valores medios mensuales, así

como indicadores de eficiencia [sesgo (BIAS), Nash Sutcliffe (NSE), Error absoluto medio (MAE) y error cuadrático medio (RMSE)].

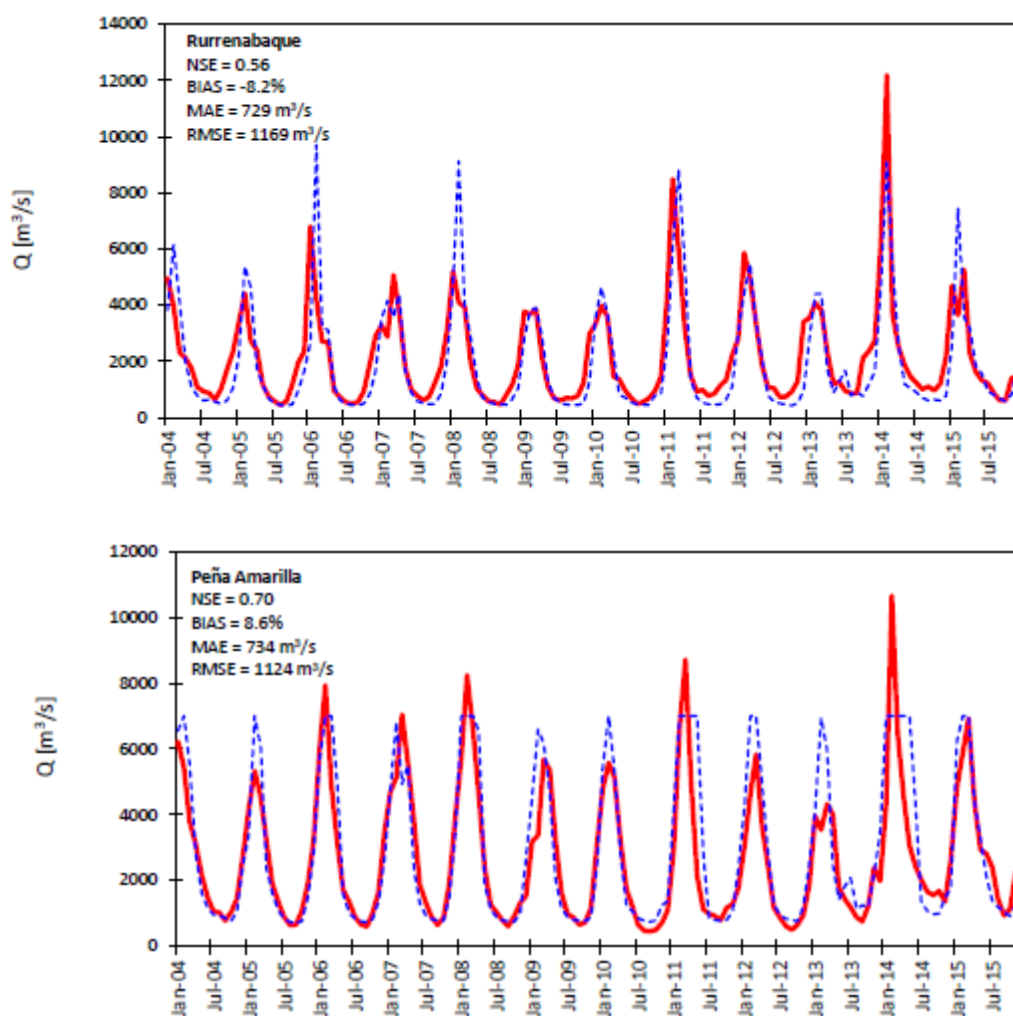


Figura 7 Hidrogramas Simulados [líneas punteadas azules] y Observados [líneas rojas] para reporte de calibración de la modelación hidrológica de la cuenca (Fuente: BHSB, 2018)

En general para las dos estaciones, se puede identificar que los resultados proveen sesgos inferiores al 10% del valor registrado y que el MAE oscila entre los +/- 729 a los +/- 734 m³/s, para un caudal medio en Rurrenabaque de 1974 m³/s, mientras que en Peña Amarilla el valor es de 2926 m³/s. los valores de caudales simulados en las cuencas del PNM serán reportados en la sección del balance hidrológico.

Finalmente, para cerrar el proceso de ajuste de modelo, se procedió a realizar la validación (ver Figura 8) en la estación Rurrenabaque en el periodo 1980 a 2000, en el cual se puede establecer que el modelo presenta un leve incremento en el sesgo [-12%], pero mantienen el mismo rango del MAE [719 m³/s].

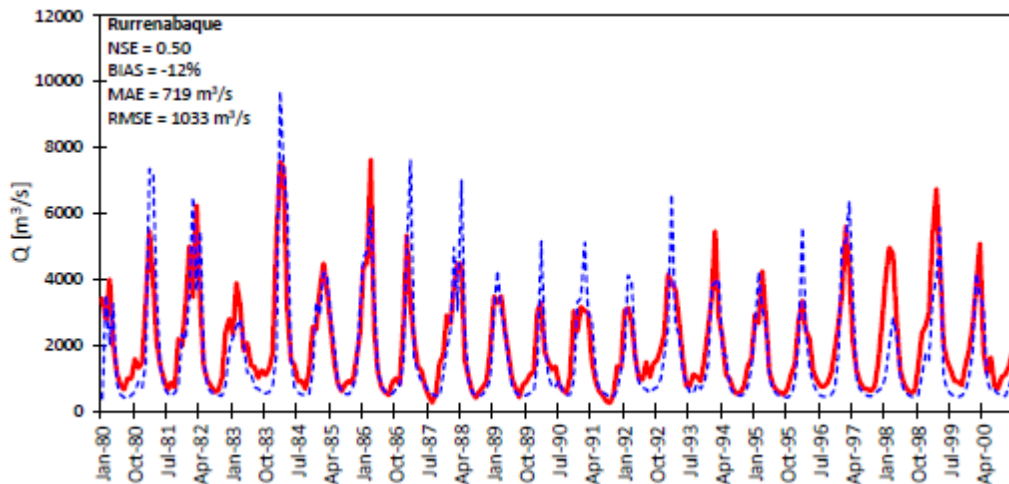
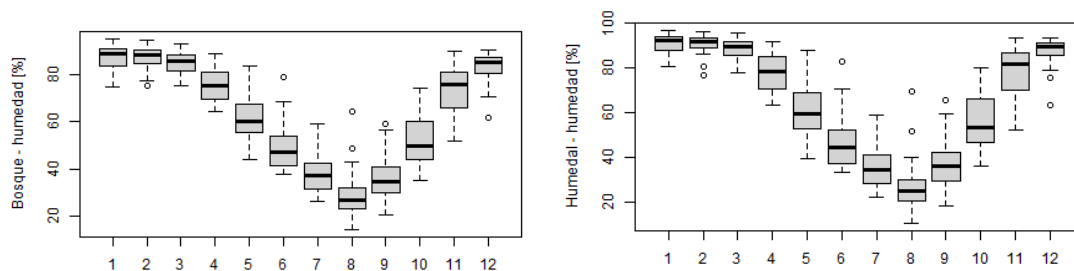


Figura 8 Hidrograma de validación en la estación Rurrenabaque para el periodo 1980 a 2000 (Fuente: BHSB, 2018)

Con los resultados del modelo hidrológico calibrado para las cuencas del **PNM**, y bajo la consideración que los MAE descritos previamente son atribuibles a los reportes individuales para cada una de las cuencas [Madidi, Hondo, Quendeque, Tuichi], se puede realizar algunas evaluaciones específicas del comportamiento del modelo en relación con las propiedades físicas de las cuencas. El modelo hidrológico producto del balance en el suelo, para la determinación de la escorrentía y retención de agua estima humedad en el subsuelo producto del proceso de infiltración, este ha sido ajustado considerando la distribución de los tres componentes hidrológicos en las diferentes coberturas de las cuencas [**Pcp**, **ETR**, **Q**]. En la **Figura 9**, se presenta los valores simulados de humedad en suelo clasificados por tipo de cobertura para toda la región de estudio, lo que permite establecer la capacidad de retención de humedad para cada cobertura, este aspecto es vital para identificar potenciales de acumulación que la cuenca usa en épocas en las cuales el agua de la lluvia no está presente [época seca **MJJA** y transición **SON**].



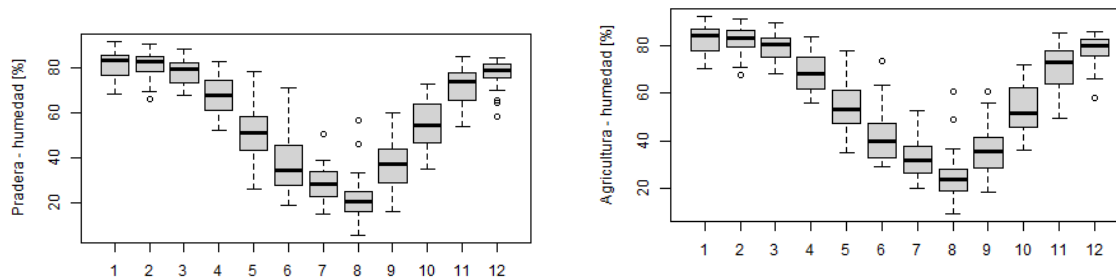


Figura 9 Reporte de Humedad en el suelo para coberturas predominantes en el PNM (Fuente: Elaboración propia)

Se ha podido cuantificar que la humedad de suelo media en el caso del Bosque los Humedales es de 66% media mensual, mientras que para la agricultura y las praderas el valor es de 58% y 59%. Los procesos de cambio predominantes en el **PNM** por lo general ocurren de Bosque → Pradera [**B-P**], Bosque → Agricultura [**B-A**]. En el caso del cambio **B-P** implica una pérdida de retención de humedad aproximada de 6.6%, mientras que **B-A** la reducción es de 7.6%. Estos resultados son preliminares y permiten establecer los márgenes de retención de humedad, que son altamente relevantes para ponderar funciones ambientales de cada cobertura, en la [Tabla 3](#), se presenta un resumen de los valores mensuales obtenidos de la modelación hidrológica de las 4 cuencas analizadas.

Cobertura	Mínimo	Máximo	Media	Mediana
Bosque	16.2	95.8	66.3	72.0
Humedal	12.5	96.8	66.0	73.4
Agricultura	9.3	92.5	58.7	63.4
Pradera	6.3	92.7	59.7	67.2
Suelo Descubierta	3.2	89.5	55.1	59.3
Matorral	7.3	91.7	58.7	62.6

Tabla 3 Valores de humedad de suelo [%] para las diferentes coberturas en las cuencas del PNM (Fuente: Elaboración propia)

Estos patrones han sido correlacionados en estudios previos, y se ha establecido que existen tendencias causadas por degradación e invasión humana al área protegida desde la región de Apolo a través de la conversión **B-P** dentro del **PNM**¹⁰, estas pérdidas son más altas en la época seca **MJJA [5-8]** como se puede ver en la Figura 10, de acuerdo con la evaluación hidrológica presente.

¹⁰ Forrest, J. L., Sanderson, E. W., Wallace, R., Lazzo, T. M. S., Cerveró, L. H. G., & Coppolillo, P. (2008). Patterns of land cover change in and around Madidi National Park, Bolivia. *Biotropica*, 40(3), 285-294.

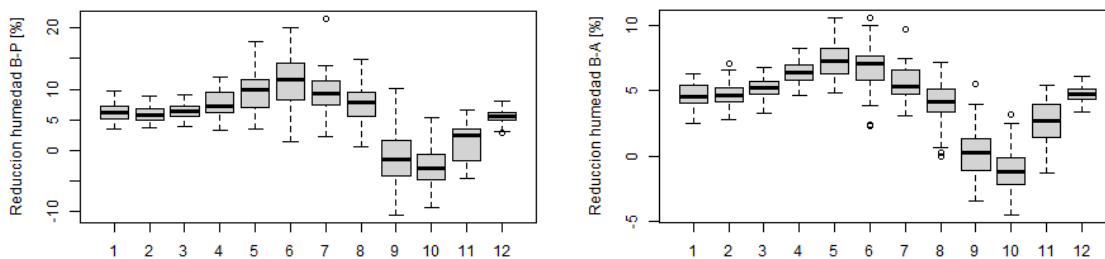


Figura 10 Diferencias en humedades relativas de suelo B-P y B-A (Fuente: Elaboración propia)

5. Balance Hídrico

La cuenca en promedio [1980 – 2015] cuenta con una precipitación anual [P] de **1778** mm, una evapotranspiración real [ETR] de **1206** [mm], y una escorrentía [Q] de **564** [mm], lo que produce un coeficiente de escorrentía [Ce] de **0.32**, la condición más húmeda corresponde al año 2014, causando un incremento del 30% en precipitación, 7% en ETR y 89% en Q relativo al valor medio, en tanto que la condición más seca se reporta para el año 1980 con un decremento de -22% en P, -10% en ETR, y -63% en Q. El reporte disgregado del balance hidrológico anual de la cuenca se presenta en la [Figura 11](#) y en la [Tabla 4](#).

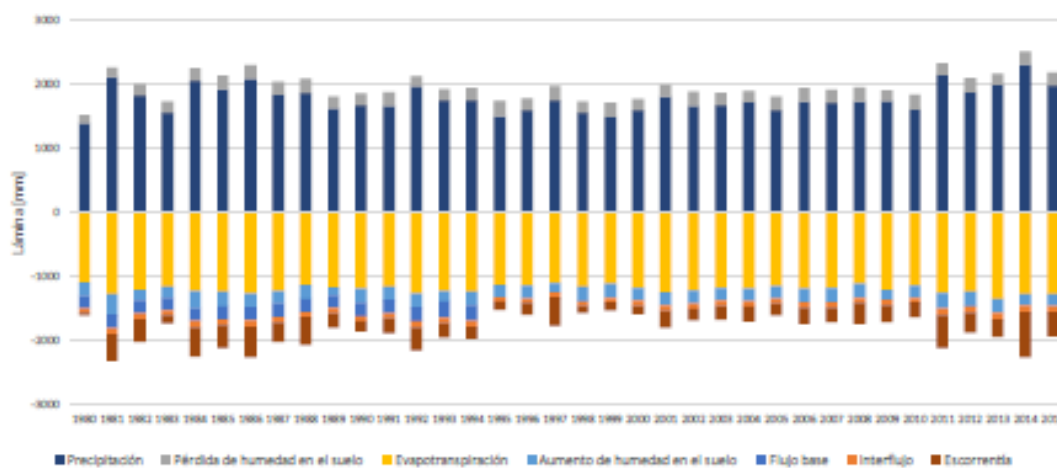


Figura 11 Balance hídrico anual de la cuenca en lámina de agua [mm] (Fuente: Elaboración propia)

Año	Precipitación	Pérdida de humedad en el suelo	Evapotranspiración	Aumento de humedad en el suelo	Escorrentía
1980	1393.6	127.1	-1092.1	-221.0	-208.0
1981	2123.1	147.4	-1290.0	-314.2	-667.2
1982	1823.4	184.7	-1216.1	-167.3	-624.5
1983	1569.7	160.4	-1173.9	-163.5	-392.9
1984	2061.3	197.7	-1237.4	-264.8	-757.1
1985	1929.7	217.7	-1242.1	-234.0	-671.6
1986	2092.6	203.6	-1277.8	-207.5	-811.2

1987	1840.3	207.4	-1238.5	-199.1	-610.3
1988	1866.7	227.8	-1142.9	-211.9	-740.1
1989	1627.1	187.5	-1176.6	-127.8	-510.1
1990	1678.0	179.0	-1205.7	-215.0	-436.7
1991	1672.8	210.0	-1171.5	-194.4	-517.1
1992	1978.0	159.6	-1273.8	-209.6	-654.5
1993	1749.8	178.0	-1233.3	-166.8	-527.7
1994	1748.8	199.0	-1245.3	-205.0	-497.7
1995	1502.9	236.0	-1137.3	-185.9	-415.5
1996	1594.5	194.6	-1151.9	-194.1	-443.3
1997	1757.7	221.7	-1110.3	-144.3	-724.6
1998	1566.2	165.7	-1171.2	-225.8	-335.4
1999	1493.8	223.0	-1118.9	-217.6	-380.6
2000	1596.5	175.9	-1195.8	-185.9	-390.9
2001	1821.0	173.9	-1250.6	-208.9	-535.7
2002	1665.2	227.2	-1219.8	-217.9	-454.8
2003	1676.1	198.3	-1188.4	-192.9	-493.3
2004	1724.8	177.5	-1198.0	-190.5	-514.1
2005	1601.3	212.7	-1160.8	-191.1	-462.2
2006	1738.1	203.0	-1204.3	-208.1	-529.0
2007	1714.3	203.5	-1191.7	-221.2	-505.2
2008	1733.0	222.4	-1119.9	-221.8	-614.1
2009	1746.3	169.7	-1210.4	-160.0	-545.7
2010	1611.3	227.6	-1150.5	-189.4	-499.0
2011	2150.1	182.1	-1262.9	-246.7	-823.2
2012	1878.6	222.7	-1241.0	-231.2	-629.3
2013	1996.2	174.5	-1358.9	-210.4	-601.6
2014	2313.7	206.4	-1286.4	-166.4	-1067.2
2015	1981.0	203.2	-1290.0	-172.1	-722.2

Tabla 4 Balance hídrico anual de la cuenca en lámina de agua [mm] (Fuente: Elaboración propia)

En términos de volumen, el balance establece a nivel anual que, de 44454 Hm³ [1281 m³/s] disponibles en P, 30733 Hm³ [978 m³/s] son ETR y 14391 Hm³ [460 m³/s] están disponibles como Q en la superficie de la cuenca.

La representación del complejo suelo/cobertura en la unidad hidrográfica permite generar una distribución espacial del balance hidrológico a nivel de UH, considerando varios factores, la Figura 12, muestra los resultados para las tres componentes del balance más el valor del coeficiente de escorrentía [Ce]. Especialmente, la escorrentía en la cuenca presenta valores de Ce bajos indicando profundidad suficiente de suelo para regular y/o almacenar el agua [0.31-0.34]

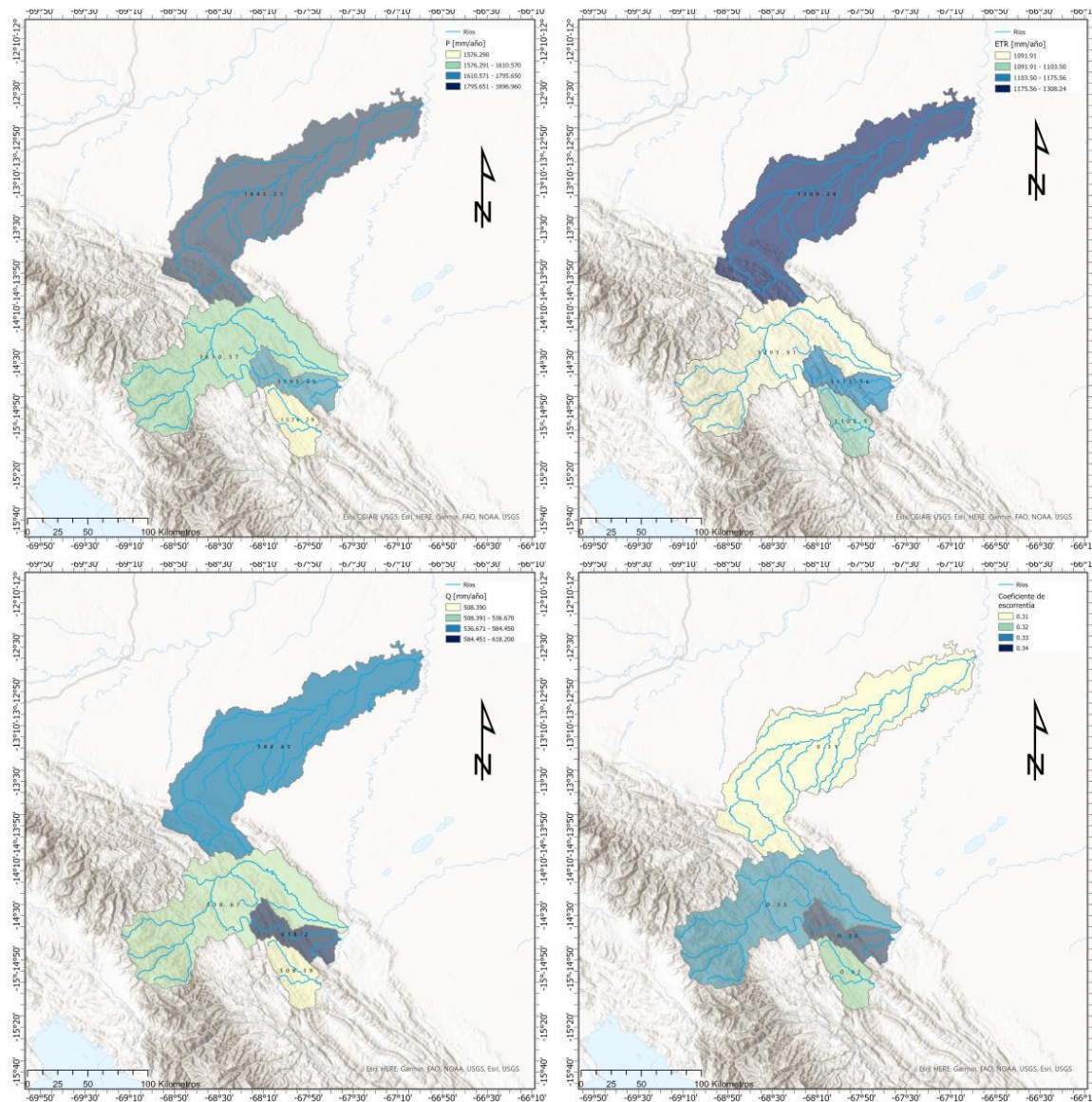


Figura 12 Balance hídrico anual a nivel de unidad hidrográfica en la cuenca para el periodo 1980 - 2015 (Fuente: Elaboración propia)

UH	Interflujo [mm]	Flujo base [mm]	Q [mm]	ETR [mm]	P [mm]	Ce
Hondo	89	169	308	1176	1796	0.34
Madidi	88	214	246	1304	1897	0.31
Quendeque	82	160	232	1104	1576	0.32
Tuichi	83	199	221	1092	1611	0.33

Tabla 5 Balance Hidrológico anual por UHO (Fuente: Elaboración propia)

La [Figura 13](#), permite ver de forma distribuida en toda la cuenca el Ce, así como también la distribución de las UHO de forma tal de contar con una referencia geográfica local sobre la implicación de estos valores de escorrentía relativa.

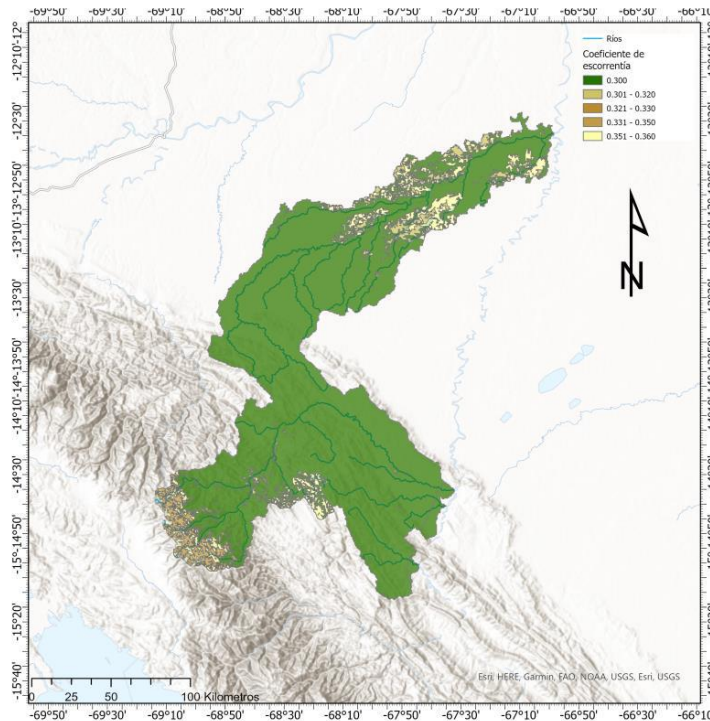


Figura 13 Coeficiente de escorrentía [1980 - 2015] a nivel de unidades del complejo suelo/cobertura para la cuenca (Fuente: Elaboración propia)

Para comprender mejor el comportamiento de la escorrentía en función a la cobertura, la [Figura 14](#) presenta diagramadas tipo Boxplot de los diferentes componentes del balance hidrológico anual [mm/año], así como los valores Ce con los datos desplegados en la [Figura 13](#).

Los balances clasificados por cobertura permiten verificar implicaciones de la localización, climatología y comportamiento del agua en cada una de estas. A excepción de la precipitación, la variación de los valores en las diferentes variables circula en un amplio rango, siendo más heterogéneos en las coberturas de bosque y humedal. En relación con la escorrentía [Q], la zona cubierta por praderas es la que genera los valores y el rango más elevado [entre los 575 a los 720 mm/año].

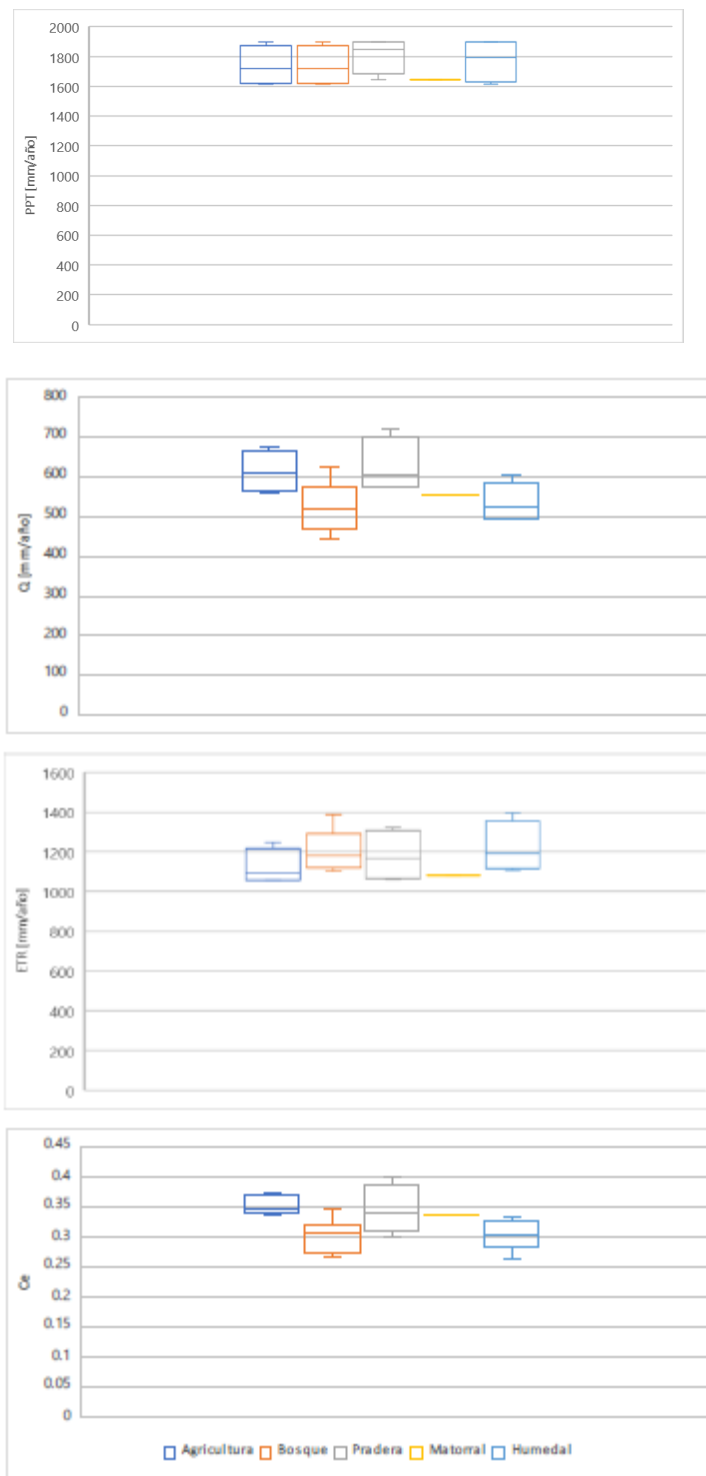


Figura 14 Diagramas boxplot del balance hídrico anual en la cuenca por tipo de cobertura (Fuente: Elaboración propia)

A nivel estacional, la cuenca presenta la temporada época húmeda entre los meses de diciembre a marzo [DJFM], para la cual precipita 1023 [mm] y escurren 352 [mm], ambos se constituyen en el 58% y el 63% de los totales anuales respectivamente. La época seca se da entre mayo a septiembre [MJJA] con una precipitación en el orden de los 204 [mm] y un escurrimiento de 96

[mm] que equivalen al 12% y el 17% de los totales anuales respectivamente, finalmente se tiene una época de transición entre septiembre a noviembre [SON] en la cual precipita 402 [mm] y escurre 66 [mm] que completan el 23% y 12% restante de los totales anuales respectivamente (ver Figura 15 para ver la distribución de valores mensual).

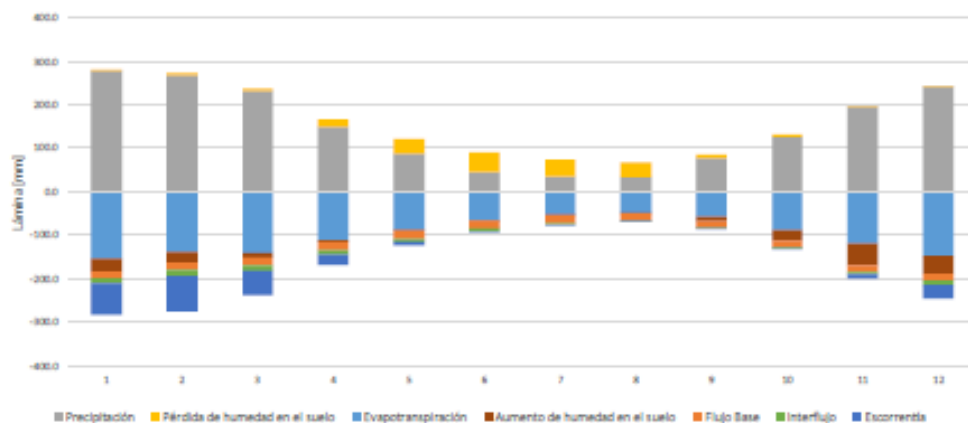


Figura 15 Balance hídrico [1980-2015] mensual de la cuenca (Fuente: Elaboración propia).

Mes	Precipitación	Pérdida de humedad en el suelo	Evapotranspiración	Aumento de humedad en el suelo	Escorrentía
Enero	278.6	3.1	-153.3	-29.2	-99.3
Febrero	269.3	4.0	-137.6	-25.9	-109.9
Marzo	232.5	5.5	-140.3	-10.6	-87.1
Abril	149.3	17.4	-111.0	-4.9	-50.8
Mayo	87.6	34.4	-87.2	-2.1	-32.6
Junio	46.1	44.8	-66.0	-0.7	-24.1
Julio	36.0	38.6	-54.0	0.0	-20.5
Agosto	34.2	33.7	-48.4	-1.0	-18.5
Septiembre	77.6	7.4	-56.8	-10.6	-17.7
Octubre	127.6	3.3	-86.9	-25.4	-18.7
Noviembre	196.4	1.1	-118.0	-50.7	-29.1
Diciembre	242.9	1.2	-147.1	-41.3	-56.1

Tabla 6 Balance hídrico mensual de la cuenca en lámina de agua [mm] (Fuente: Elaboración propia)

El mes con mayor escorrentía se da en febrero con 110 [mm] de lámina o 1140 m³/s, mientras los meses con menor escorrentía es julio con 21 [mm] de lámina o 195 m³/s. El mes con mayor incidencia de ETR corresponde al mes de enero con 153 [mm], mientras que el con menor valor es agosto con 48 [mm]. Durante el periodo de evaluación [1980-2015], se representaron diferentes condiciones de balance, el resumen estadístico es presentado en la Figura 16, para las variables descritas previamente.

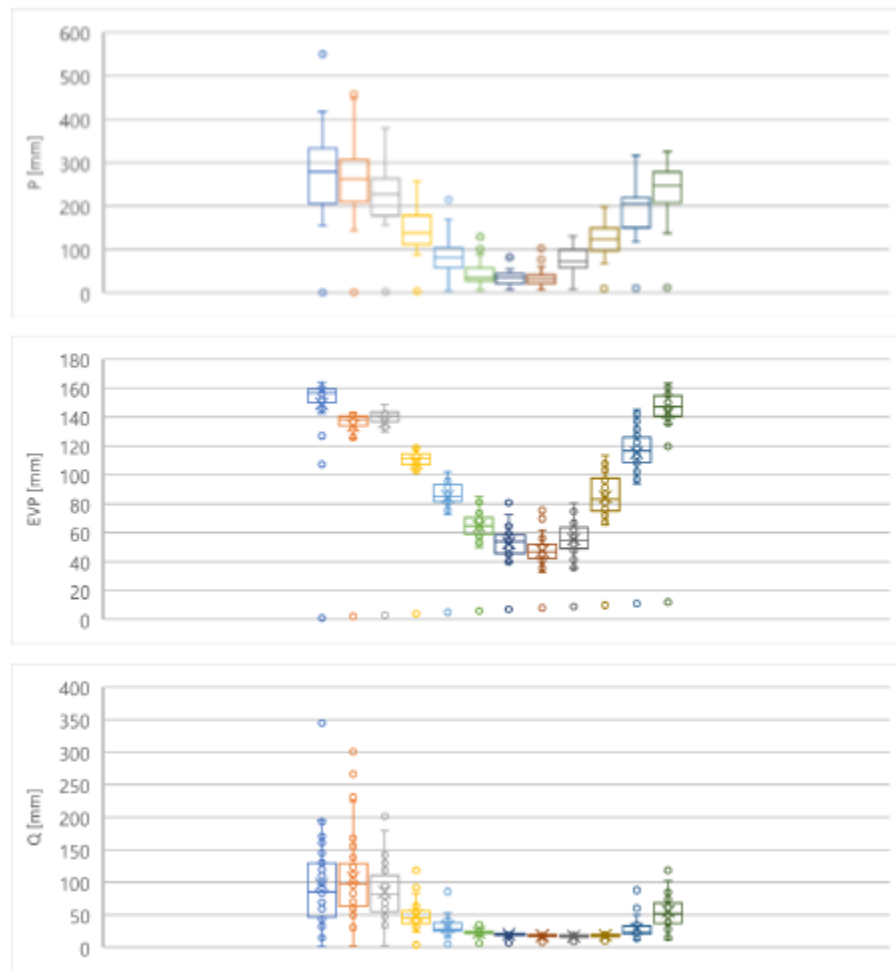


Figura 16 Rangos de variación mensual en las variables hidrológicas (Fuente: Elaboración propia).

El reporte de balance hidrológico permite describir la distribución de caudal en la red de ríos de la cuenca, bajo las diferentes condiciones climáticas sostenidas en los años de modelación [1980-2015], la [Figura 17](#) presenta la condición media de caudal en la cuenca.

La [Tabla 7](#), provee información sobre los caudales simulados en los ríos que constituyen la red de drenaje de la cuenca. La descripción de estos es relevante para establecer su potencial en términos de cantidad, así como el grado de aportación sobre el recorrido hídrico principal, donde se concentra el caudal agregado que es drenado a la salida de la cuenca.

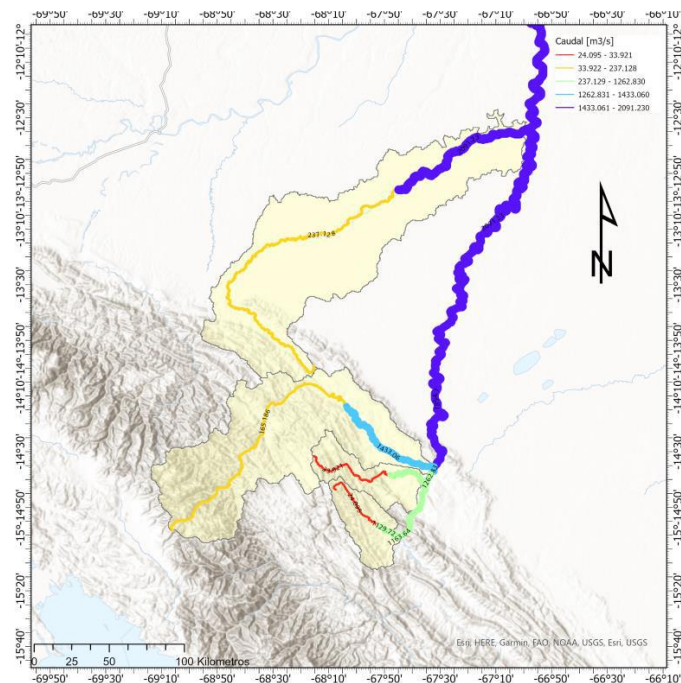


Figura 17 Caudal medio [m³/s] en la cuenca [1980-2015] (Fuente: Elaboración Propia).

Río	Punto	Q25	Q50	Q75	Q90	Min	Max	Media
Quendeque	Quendeque	30.2	29.9	12.6	8.8	5.5	204.0	24.1
Hondo	Hondo	44.7	44.6	18.2	11.3	6.9	285.8	33.9
Tuichi	Tuichi	193.3	187.8	92.6	69.9	32.1	1192.7	165.2
Madidi	Madidi	294.4	293.9	138.7	98.2	40.4	1851.7	237.1
Beni	Afluencia Quendeque	1504.6	1492.1	528.5	367.2	220.7	7530.8	1129.7
Beni	Afluencia Hondo	1537.9	1530.3	544.5	378.7	234.9	7746.7	1163.6
Beni	UHM29	1720.4	1696.9	589.5	409.4	272.3	8250.9	1262.8
Beni	Afluencia Tuichi	1928.5	1919.7	681.6	474.6	41.9	8310.5	1433.1
Beni	Peñas Amarillas	2495.8	2471.3	944.2	653.3	388.5	11045.2	1854.1
Beni	Afluencia Madidi	2828.6	2776.2	1103.6	759.7	428.9	12896.9	2091.2

Tabla 7 Reporte de caudales [m³/s] en puntos relevantes de la red de drenaje de la cuenca para varios valores de excedencia convencionales (Fuente: Elaboración propia).

Según las condiciones medias de la cuenca en términos del drenaje de agua en los ríos de la cuenca, se reporta que Beni después de recibir las aguas provenientes del Parque Nacional Madidi [PNM] tiene una media de 2091 m³/s. Los aportantes más relevantes, como el caso del río Madidi cuenta con un caudal al ingreso al río Beni de 237 m³/s y Tuichi cuenta con 165 m³/s en la confluencia (ver [Tabla 7](#)).

6. Análisis

El estudio de modelación hidrológica cuantifica que la humedad retenida en el suelo en el caso de los bosques y humedales es en promedio 66% y coberturas como praderas y agricultura presentan valores inferiores al 59%. En promedio, la transformación de bosques a praderas o terrenos agrícolas implicaría una reducción entre el 6.6 al 7.6% en la retención de humedad en el suelo [ver Figura 9]. El mes en el que se presentaría mayor impacto sería mayo, con una reducción que podría alcanzar valores cercanos al 10%.

Según los registros de los últimos años simulados se aprecia un aumento en la precipitación en la cuenca superándose los 2000 mm/año, sin embargo, la escorrentía aumenta de manera similar liberando el exceso de humedad en la cuenca, alcanzando su máximo histórico en el año 2014 [713 mm/año] [ver Figura 11 y Tabla 4].

Consecuentemente al periodo seco en la cuenca, se presenta la mayor pérdida de humedad en el suelo entre mayo y agosto, alcanzando su máximo en el mes de julio, en el cual dicha pérdida se aproxima al valor de la precipitación [44 mm/mes] [ver Figura 15]. Para esta condición (75% de excedencia) la cuenca Madidi constituye el 13%, Tuichi 15%, Hondo 3% y Quendeque 3% del caudal en el río Beni hasta su confluencia [ver Tabla 7].

7. Sigüientes pasos y recomendaciones

- En análisis hidrológico desarrollado utiliza información monitoreada en el río Beni, no cuenta con datos en las cuencas del PNM [Parque Nacional Madidi], por lo cual, se recomienda consolidar y verificar la información reportada en este documento con campañas de medición de caudal e instrumentación, esto puede ser desarrollado de manera coordinada con el SERNAP [Servicio Nacional de Áreas Protegidas].
- El presente análisis hidrológico brinda información desagregada por cada una de las cuencas delimitadas en el parque, esta información puede ser precursora para iniciar el análisis de calidad de agua, en el cual se sugiere priorizar la cuenca Tuichi debido al aporte significativo al caudal del río Beni y de la cual se tiene información sobre la presencia de explotaciones mineras que potencialmente podrían afectar a las comunidades indígenas Marka Cololo Copacabana Antaquilla y San José de Uchupiamonas.
- El análisis desarrollado estima que en el mes de mayo la diferencia de retención de humedad entre bosque y pradera/agricultura es cercana al 10%, este valor debe ser considerado implícitamente en todos los procesos de cambio de uso de suelo que estuviesen sucediendo en el PNM, por lo cual se recomienda realizar estudios que

permitan inventariar de manera precisa las zonas y el área que están sufriendo cambios en la actualidad, dado que estudios similares son anteriores al año 2010.

8. Referencias

Salati, E., & Nobre, C. A. (1991). Possible climatic impacts of tropical deforestation. In *Tropical forests and climate* (pp. 177-196). Springer, Dordrecht.

Coppolillo, P., Gomez, H., Maisels, F., & Wallace, R. (2004). Selection criteria for suites of landscape species as a basis for site-based conservation. *Biological Conservation*, 115(3), 419-430.

Silva, R., Robison, D., McKean, S., & Álvarez, P. (2002). La historia de la ocupación del espacio y el uso de los recursos en el PNANMI Madidi y su zona de influencia. WCS-CARE and the European Community, La Paz, Bolivia.

Goulding, M., Barthem, R., & Ferreira, E. J. G. (2003). *The Smithsonian atlas of the Amazon*.

Ministerio del Medio Ambiente y Agua. (2018). Balance Hídrico Nacional. <https://datos.siarh.gob.bo/biblioteca/406>

Bontemps, S., Defourny, P., Radoux, J., Van Bogaert, E., Lamarche, C., Achard, F., ... & Arino, O. (2013, September). Consistent global land cover maps for climate modelling communities: current achievements of the ESA's land cover CCI. In *Proceedings of the ESA living planet symposium, Edimburgh* (Vol. 13, pp. 9-13).

Wieder, W. R., Boehnert, J., Bonan, G. B., & Langseth, M. (2014). *Regridded harmonized world soil database v1. 2*. ORNL DAAC.

Forrest, J. L., Sanderson, E. W., Wallace, R., Lazzo, T. M. S., Cerveró, L. H. G., & Coppolillo, P. (2008). Patterns of land cover change in and around Madidi National Park, Bolivia. *Biotropica*, 40(3), 285-294.