



**CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL
DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA**

DIVISIÓN DE EDUCACIÓN

ESCUELA DE POSGRADO

**MAESTRÍA EN MANEJO Y GESTIÓN DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS
MODALIDAD VIRTUAL**

**ESTIMACIÓN DE PRODUCCIÓN DE AGUA DE LA RESERVA NATURAL
DEL BOSQUE MBARACAYU A LA CUENCA ALTA DEL RÍO JEJUI (DPTO.
CANINDEYU, PARAGUAY) MEDIANTE MODELACIÓN HIDROLÓGICA
(SWAT)**

**TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN SOMETIDO A CONSIDERACIÓN DE LA
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN Y LA ESCUELA DE POSGRADO COMO REQUISITO
PARA OPTAR AL GRADO DE**

MÁSTER EN MANEJO Y GESTIÓN DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS

MARIO SEBASTIÁN MÉNDEZ FERREIRA

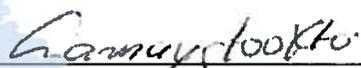
TURRIALBA, COSTA RICA

2020

Este trabajo de graduación ha sido aceptado en su presente forma por la División de Educación y la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobado por el Comité Asesor del estudiante, como requisito para optar por el grado de

Máster en Manejo y Gestión de Cuencas Hidrográficas

FIRMANTES:



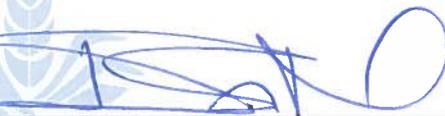
Ney Ríos, M.Sc.

Co asesor del Trabajo de Graduación



Margarita Pereira, Dra.

Co asesora del Trabajo de Graduación



Isabel A. Gutiérrez-Montes, Ph.D.

Decana de la Escuela de Posgrado



Mario Sebastián Méndez Ferreira

Candidato

DEDICATORIA

A Dios por permitirme cumplir un sueño anhelado desde hace tiempo.

A mi esposa, por animarme y acompañarme desde el inicio en esta aventura con su: ¡Sí quiero! ¡Gracias por existir!

A mis padres, hermanos/as, cuñados/as, suegros y concuñados por apoyarme y comprender mis ausencias o visitas fugaces.

A mi promoción de maestría por el aliento y apoyo que siempre me brindaron. Al grupo especial de la "Banda de los 4" por sobresalir en las clases, permitirse abrir un poco más y compartir sus vidas para conocernos más allá de lo profesional.

A todo el cuerpo docente del CATIE por sus enseñanzas, en especial a mi asesor Ney Ríos por la paciencia, acompañamiento, enseñanza y dedicación para transmitir su conocimiento.

A mi co-asesora Margarita Pereira, por la paciencia y enseñanza, por enseñarme esos tips de visión de proyecto que me sirvieron mucho.

A la Fundación Moisés Bertoni, en especial al Sr. Danilo Salas por la confianza y permiso para llevar a cabo, en la Reserva Natural del Bosque Mbaracayu, este trabajo. A Sixto Fernández y a los guardaparque por el apoyo logístico que me brindaron durante las visitas a la reserva.

A Marcelo Solis, Jorge Ugarte, Sonia Cabrera, por la ayuda logística y acompañamiento a la reserva para el trabajo de campo. ¡Profundamente agradecido!

A Andrés Cáceres y Adriana Franco por la buena predisposición y apoyo incondicional para llevar a cabo este trabajo.

A Osvaldo Barresi, Paola Inchausti y Víctor Martínez por el apoyo técnico a la distancia que me brindaron durante la elaboración de este trabajo.

A Sandra Fariña por el apoyo con datos sobre la reserva, ellos fueron fundamentales para sacar adelante este trabajo.

A Latino Martínez, mi Maestro de vida, por alentarme siempre a superarme y hacerme saber de lo que soy capaz.

Gracias totales a todos los que hicieron posible este sueño.

Mario S. Méndez F.

INDICE

INDICE DE TABLAS	V
INDICE DE FIGURAS	VI
LISTAS DE ACRÓNIMOS	VII
LISTAS ABREVIATURAS	VIII
RESUMEN	IX
ABSTRACT	X
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Justificación.....	2
1.3. Importancia.....	4
2.1. Objetivo general	5
2.2. Objetivos específicos	6
3. REVISIÓN LITERARIA	6
3.1. El ciclo hidrológico.	7
3.2. La Hidrología y su importancia.....	8
3.3. Interrelación, importancia e implicancia de la intervención antrópica en el ciclo hidrológico.....	8
3.4. Balance hídrico	9
3.5. Modelos hidrológicos.....	10
4. METODOLOGÍA	11
4.1. Área de estudio	11
4.1.1. Clima	12
4.1.2. Características del suelo	12
4.1.3. Topografía.....	12
4.1.4. Hidrografía	13
4.2. Modelación hidrológica con SWAT	13
4.2.1. Ecuación SWAT.....	15
5. RESULTADOS y DISCUSIÓN	16
6. CONCLUSIÓN	25
8. BIBLIOGRAFÍA	28
9. ANEXO	30

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Proporción de tipo de suelo, cobertura y pendiente en relación a la cuenca de la RNBM	18
Tabla 2: Valores promedio mensual de la cuenca	20
Tabla 3: Valores de generación de agua por sub cuencas	21
Tabla 4: Tabla de flujo superficial de agua por sub cuenca	22
Tabla 5: Comportamiento hídrico mensual según cobertura.....	24
Tabla 6: Caudales de arroyos y río observados.....	25
Tabla 7: Relación de proporciones del balance hídrico en la cuenca de la RNBM.....	26

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ecorregión Bosque Atlántico	6
Figura 2: Representación simplificada del ciclo del agua	8
Figura 3: Ciclo hidrológico ante el cambio climático	9
Figura 4: Esquema de un balance hídrico.....	10
Figura 5: Mapa de base del área de la Biosfera de la RNM en el Departamento de Canindeyu con la CARJ.	12
Figura 6: Orografía de la Región Oriental - Paraguay.....	13
Figura 7: Esquema de trabajo con datos SWAT	145
Figura 8: Delimitación de sub cuencas de la RNBM.....	17
Figura 9: Balance hídrico de la RNBM.....	19
Figura 10: Hidrograma de la RNBM.....	20
Figura 11: Generación de agua por sub cuenca de la RNBM.....	22
Figura 12: Caudal de las sub cuencas de la RNBM.....	23
Figura 13: Ubicación espacial de los cuerpos de agua observados.....	25

LISTAS DE ACRÓNIMOS

ASP – Área Silvestre Protegida.

BAAPA – Bosque Atlántico del Alto Paraná.

BM – Banco Mundial.

CDC – Centro de Datos para la Conservación.

CFSR - Climate Forecast System Reanalysis.

CARJ - Cuenca alta del Río Jejuí.

CFI – Corporación Financiera Internacional.

DEM – Digital model of elevation.

FMB – Fundación Moisés Bertoni.

HRU – Unidad de respuesta hidrológica.

MNHN – Museo Nacional de Historia Natural del Paraguay.

ODS - Objetivos de Desarrollo Sostenible.

RNBM - Reserva Natural del Bosque Mbaracayu.

SIG – Sistema de información Geográfica.

SINASIP - Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas.

SWAT – Soil water assessment tool.

TNC – The Nature Conservation.

LISTAS ABREVIATURAS

ha – Hectáreas

km – Kilómetro

km² - Kilómetro cuadrado

m² – Metro cuadrado

m³ - Metro cúbico

msnm – Metros sobre el nivel del mar

mm - Milímetro

% - Porcentaje

RESUMEN

El trabajo de investigación se realizó en la Reserva Natural del Bosque Mbaracayú (RNBM), cuenca alta del río Jejuí (CARJ), Departamento de Canindeyú, Paraguay. La reserva tiene una dimensión de 64.405 hectáreas de superficie. El objetivo de la investigación fue estimar la producción de agua de la reserva mediante la cuenca alta del río Jejuí utilizando la modelación hidrológica SWAT con la interface QGIS (QSWAT 1.9). Se tomaron medidas de caudal *in situ* a cuatro cuerpos de agua ubicados dentro de la reserva a modo de práctica y empezar a generar los primeros registros de caudal.

Cabe resaltar que no se cuenta con una base de datos de caudal de la cuenca en estudio; la cual se encuentra dentro de la reserva; tampoco con datos precisos y continuos de precipitación y temperatura de la zona. Por ello, se recurrió a descargar datos diarios de la herramienta SWAT Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) en su formato para la ubicación de la reserva y un periodo determinado (1979-2014). El Modelo de Elevación Digital (DEM) fue extraído de Google Earth Engine.

La simulación obtenida del SWAT aportó un primer reporte de comportamiento hídrico en toda la superficie de la reserva, obteniendo 12 sub cuencas en total, siendo mayor la delimitación SWAT a la delimitación física de la reserva. Los resultados y análisis están determinados por cada sub cuenca desde la perspectiva de generación de agua, caudal y evapotranspiración, tres factores fundamentales dentro de un balance hídrico.

Si bien la simulación brinda un primer reporte para un planteamiento de manejo y gestión del recurso hídrico de la reserva, es importante contar con mediciones de mayor calidad y precisión pues es requisito para contar con sistemas de medida eficientes que adoptará la RNBM para llegar a la calibración final de datos a ser obtenidos.

Palabras claves: Cuenca alta del Río Jejuí, Generación de agua, Reserva Natural del Bosque Mbaracayu, SWAT.

ABSTRACT

The research was carried out in the Mbaracayú Forest Natural Reserve (RNBM), upper basin of the Jejuí river (CARJ), Department of Canindeyú, Paraguay. The reserve has a dimension of 64,405 hectares of surface. The objective was to estimate the water production of the reserve through the upper basin of the Jejuí river using SWAT hydrological modeling with the QGIS interface (QSWAT 1.9). Flow measurements were taken in situ to four bodies of water located within the reserve as a practice and begin to generate the first flow records.

Since there is no database of flow of the basin under study; which is within the reserve; precise and continuous data on precipitation and temperature in the area are also not available. Therefore, daily data was downloaded from the SWAT Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) tool in the same format for the location of the reserve and a specific period (1979-2014). The DEM (Digital Elevation Model) was extracted from Google Earth Engine.

The simulation obtained from SWAT led to having a first report of water behavior on the entire surface of the reserve, obtaining 12 sub-basins in total, the SWAT delimitation being greater than the physical delimitation of the reserve. The results and analysis are determined for each sub-basin from the perspective of water generation, flow and evapotranspiration, fundamental factors within a water balance.

Although the simulation provided a first report for an approach to the management of the reserve's water resources, it is important to have data quality in the measurements and data precision that require efficient measurement systems that the RNBM must adopt to reach calibrate the obtained data.

Key words: High Basin of River Jejuí, Water generation, Mbaracayu Forest Nature Reserve, SWAT.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

En el año 1986, a partir de estudios realizados por Antropólogos de la Universidad de Emory, Atlanta (Georgia, Estados Unidos) se reconoce la importancia de la superficie del territorio ancestral de los Aché (alrededores de lo que hoy es la Reserva Natural del Bosque Mbaracayu), su buen estado de conservación, y se accede al dato de que la misma sería vendida a corto plazo por su propietario Corporación Financiera Internacional (CFI) rama ejecutiva del Banco Mundial (BM), a compañías agrícolas o ganaderas para su transformación a actividades económicamente productivas.

En este contexto The Nature Conservation (TNC) presentó al Centro de Datos para la Conservación (CDC) la idea de establecer la Reserva Natural del Bosque Mbaracayu como una oportunidad para la conservación de recursos naturales en Paraguay. En 1987, profesionales del CDC, el Museo Nacional de Historia Natural del Paraguay (MNHN) organización de TNC y Missouri Botanical Garden llevaron a cabo estudios que determinaron la importancia biológica del área y la necesidad de convertir la propiedad en un Área Silvestre Protegida (ASP). Tras ser aceptada dicha idea, en 1988 se firma el Acta de Fundación de la Fundación Moisés Bertoni (FMB) para la Conservación de la Naturaleza con el objetivo de contribuir a la conservación y el desarrollo sostenible de los recursos naturales del país.

Luego de varios estudios que consolidan la idea de conservar, se negocia la compra del territorio entre la CFI y la TNC junto con la FMB para trabajar juntos con el fin de encontrar un arreglo satisfactorio para la protección perpetua del Mbaracayu. En enero de 1992 se logra la compra de la propiedad (57.715 ha) a nombre de la FMB, organización privada no gubernamental. En diciembre de ese mismo año se adquiere en remate público del Ministerio de Hacienda un inmueble (4.264,45 ha) que contiene ecosistemas Cerrados, denominados Aguará Ñú. En el año 1994 la Fundación Mbaracayú adquiere 1.223,4 hectáreas más de un ganadero de la zona vecina al terreno adquirido anteriormente, sumando hasta el momento un total de 63.223,4 hectáreas. Por último, en agosto de 1996 el Instituto de Bienestar Rural transfirió a la Fundación Mbaracayú dos fracciones de terreno, una de 876 hectáreas y otra de 326 hectáreas. Con esta última ampliación en la actualidad la reserva cubre 64.405,75 hectáreas de superficie.

En el 2000, la UNESCO y el programa Man and Biosphere (MAB), por decisión del Consejo Internacional de Coordinación del Programa sobre el Hombre y la Biosfera, certificó el Bosque Mbaracayú-Paraguay, a fin de formar parte de la Red Mundial de Reservas de la Biosfera. Representando así el 2,6% del total de hectáreas que componen el Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas (ASP) del Paraguay, y el 32,7% de todas las ASP localizadas en la ecorregión Bosque Atlántico del Alto Paraná (BAAPA). (Fundación Moisés Bertoni, 2005)

La Reserva Natural del Bosque Mbaracayu (RNBM) contribuye, directa e indirectamente, al cumplimiento de algunos objetivos estratégicos generales en los que se basa la Estrategia Nacional y Plan de Acción sobre Biodiversidad (ENPAB), dando continuidad a labores que contemplan otros objetivos estratégicos. Entre ellos se pueden mencionar los siguientes: fortalecer el Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas (SINASIP); mantener bajo alguna categoría de manejo compatible con la conservación y el uso sostenible de la biodiversidad, y fomentar las investigaciones sobre los recursos naturales del país; y mejorar los marcos legales, regulatorios e institucionales en el ámbito ambiental; entre otros.

Fariña et. al (2019) realizó una interpretación hidrogeológica de la RNBM en la que se detalla y describe las unidades hidrogeológicas, balance hídrico de las cuencas, análisis de la vulnerabilidad intrínseca y específica de los acuíferos identificados junto con su respectivo mapeo del riesgo a la contaminación, y zonificaciones de protección de los recursos hídricos. Cabe mencionar que se llevó a cabo evaluaciones y determinación de vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea (Larroza 2005).

En el marco del programa de Aguas de la Fundación Moisés Bertoni (FMB) existen antecedentes de estudio hidrogeológico del área de la RNBM y balances hidrológicos. Esta área ecológicamente es única dentro de la Región Oriental, debido a que se encuentra en una zona de transición entre los tipos de bosques "tropical y templado", presentando una variedad de ecoregiones terrestres sujetos a tipos de suelo que hacen variar los paisajes dentro del mismo territorio; es zona de nacientes y origen del segundo mayor contribuyente del río Paraguay y se encuentra sobre acuíferos productivos pertenecientes al Sistema del Acuífero Guaraní. (Larroza 2005).

Dentro del marco de la estimación de generación de agua por parte de la Reserva Natural del Bosque Mbaracayu (RNBM), perteneciente a la Fundación Moisés Bertoni (FMB), se obtienen los primeros registros *in situ* de datos meteorológicos que permitirá iniciar una base de datos propia, dando así insumos que impulsarán futuros proyectos de manejo y gestión de recursos hídricos.

1.2. Justificación

La Reserva Natural del Bosque de Mbaracayu (RNBM) posee la riqueza biológica característica del Bosque Atlántico del Alto Paraná (BAAPA), ecoregión que año a año se va perdiendo pues es muy bajo el porcentaje que queda aún como pulmón de la misma. Esta RNBM forma parte vital de recarga de uno de los acuíferos más grandes del mundo, el Acuífero Guaraní. Por tanto conocer lo que tiene, actualizar la base de datos, comprender su función, proteger la reserva y tomar medidas de acción sobre la RNBM es clave y vital para la sostenibilidad de este importante recurso natural.

En este contexto cabe plantear que los objetivos nacionales de conservación de la RNBM dentro del ámbito de recurso hídrico son: promover y participar en la restauración de áreas degradadas, particularmente en la zona de amortiguamiento. Mantiene y protege parte de la cuenca hidrográfica más importante del país (cuenca alta del Río Jejuí - CARJ) asegurando el flujo y la calidad del agua, controla y evita la erosión y sedimentación especialmente en los lugares relacionados directamente con las inversiones que se realizan en la parte baja de los ríos las cuales depende del agua para el transporte, irrigación, agricultura, pesca, recreo y para la protección de zonas naturales y humedales fomentando de esta manera el ordenamiento territorial/ambiental de la Cuenca Alta del Río Jejuí y el uso sostenible de sus recursos naturales, dentro del contexto de la RNBM. (Plan de manejo RNBM, 2005)

En consonancia con los objetivos de conservación se afirma que el éxito de la conservación y el uso sustentable de los recursos naturales se basan en gran medida en el adecuado conocimiento científico, por lo que la investigación y el monitoreo de los recursos de la reserva y la Cuenca Alta del Río Jejuí (CARJ) son de conocimiento prioritario. Ello implica la búsqueda de planes de remediación a través de los flujos naturales para el mantenimiento del ciclo y el flujo de agua (Plan de manejo RNBM, 2005).

En el ámbito de propuestas de nomenclatura se incorpora las planteadas por el Banco Mundial para Latinoamérica y el Caribe, la FMB reconoce que la RNBM se localiza en un área de transición entre las ecorregiones Bosque Atlántico Interior y Cerrado. Actualmente se denomina a la ecorregión Bosque Atlántico del Alto Paraná (BAAPA) (Di Bitetti, 2003), clasifica a esta ecorregión como un bosque subtropical semicaducifolio, mientras que la parte de cerrado lo clasifica como un complejo de praderas y sabanas arboladas tropicales y subtropicales (FMB, 2005).

Vale destacar la importancia de considerar dentro de esta reseña las características físicas del área considerando que la RNBM son áreas de descarga del flujo regional, y áreas de recarga local, específicamente del acuífero Guaraní destacando en esto que dicha sub cuenca representa también una valiosa reserva de agua subterránea. Este ecosistema engloba así una riqueza biológica que merece ser estudiada, investigada y conservada.

En la actualidad las estaciones meteorológicas cumplen una función fundamental, contundente y vital y es una herramienta con la que no cuenta la RNBM. Generar esta clase de base de datos aplicada a un Sistema de Información Geográfico (SIG) puede colaborar en la toma de decisiones acorde al panorama citadino o rural al cual se quiere estudiar. Ambos (SIG y datos meteorológicos) son herramientas que hoy día se volvieron necesarias dentro de una cuenca hidrográfica ante las consecuencias del cambio climático. Empezar a generar datos que permitan responder con resiliencia eficaz y disminuir factores de riesgo son temas a considerar en la actualidad dentro del campo de la hidrología.

Así mismo la esencia de un Sistema de Información Geográfica (SIG) son los datos geográficos y por ello es imperiosa la necesidad de empezar a generar una base de datos propios y por sobre todo de calidad. Ello brindará la posibilidad de tener datos precisos y exactos que pueden dar lugar a trabajos de manejo de suelo, planes de resiliencia, predecir posibles lugares de generación de erosiones o inundaciones, determinar zonas de mayor recarga hídrica, por citar algunos proyectos. Todos estos posibles proyectos podrían tener eco tanto en las comunidades aledañas a la reserva o en la misma.

La escasez de documentación científica en el Paraguay relativa a estudios de recursos hídricos en reservas, parques nacionales, es el principal motivo que impulsa la ejecución de este trabajo. Por ello generar una base de datos propia a partir de estaciones meteorológicas para la proyección de un plan de manejo hidrográfico más preciso es el hincapié para empezar a hablar de manejo y gestión de cuencas hidrográficas, empezando a disminuir las traspolaciones de datos y tener los del mismo lugar para obtener resultados precisos y objetivos.

La catástrofe de incendios forestales registrados el año 2019 dentro de la reserva ocasionando pérdidas importantes de bosque pasa a ser el primer registro de incendio forestal que afectó a la misma, siendo esta una amenaza y obligando a la FMB a poder llegar a tener un plan de resiliencia ante la pérdida. No hay duda que el bosque genera y aporta una cantidad considerable de agua para la cuenca alta del Río Jejuí, el 2º mayor tributario interno del Río Paraguay. A su vez, el río Paraguay es el principal afluente del río Paraná que es uno de los más importantes de la Cuenca del Plata. Es la principal arteria fluvial del país y su curso alto forma en gran parte los mayores humedales de América.

1.3. Importancia

El análisis y ajuste de estimación de generación de agua de la Reserva Natural del Bosque Mbaracayu (RNBM) contribuye con los estudios sobre la temática que se encuentra realizando de manera paulatina la Fundación Moisés Bertoni. Dicho estudio forma parte de un primer informe de análisis de disponibilidad del recurso hídrico de la RNBM.

Debido a lo anterior, a partir del estudio se contará con datos actuales de la disponibilidad hídrica de la reserva, contemplando así también la cuenca alta del río Jejuí, la cual atraviesa la misma y será considerado solo ese tramo dentro de este estudio. Los beneficiarios directos de este recurso son los integrantes de una comunidad indígena Aché de Avá Katueté (22 familias aproximadamente), situadas en el área de Aguara Ñu. El uso del agua dentro de la reserva se encuentra dedicada netamente a la conservación, excepto algunas prácticas no consuntivas como canotaje y saltos de agua. Los estudios hidrogeológicos y balances hídricos son fundamentales para realizar una estimación de generación de agua producida por la propia reserva. De manera indirecta

los inversionistas que realizan distintas actividades en la parte de baja de los ríos, dependen del agua para el transporte, irrigación, agricultura, pesca, recreo y para la protección de zonas naturales y humedales (DGEEC, 2016).

El distrito de Ygatimí, abarca la mayor superficie de la Cuenca Alta del Río Jejuí población alrededor de la reserva es económicamente activa gracias a la explotación agrícola y agropecuaria, incluso es una de las tasas de ocupación más alta del país en lo que respecta a la agricultura.

Ante el escenario de escasez de estaciones meteorológicas en la zona, tanto privadas como nacionales, el hecho de empezar a tener estaciones propias dentro de la RNBM tiene mayor relevancia, ya que los datos y trabajos que se generen serían de mayor calidad por su precisión y exactitud. Datos como caudales, empezarían a ser los primeros registros a esa altura es otro aporte que contempla recaudar mayor información para el país y este caso específico, para la reserva.

Contemplando la preocupación de la disponibilidad de calidad de agua y cantidad dentro de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el cambio climático se llegaron a acuerdos para mejorar las condiciones de adaptación y mitigación del efecto del cambio climático en varios sectores. Dos de esos acuerdos son los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS); objetivos 6 y 13, agua limpia y acción por el clima respectivamente; donde mira al agua y al bosque en varios aspectos de cuidado para garantizar la disponibilidad de agua, gestión sostenible y el saneamiento para todos, fortalecer la resiliencia y la capacidad de adaptación a los riesgos relacionados con el clima, así como incorporar medidas relativas al cambio climático en estrategias.

La importancia de este trabajo radica en proporcionar información con miras a la consolidación del conocimiento científico y técnico que se requiere para implementar futuras acciones para la protección sustentable de la RNBM, del recurso hídrico y bosque a fin de comenzar a generar un plan de manejo y gestión integral de la cuenca. Esto considerando que teniendo datos propios o más cercanos a la reserva podemos generar trabajos; abriendo así puertas a una gama de posibilidades sobre investigación y desarrollo de la zona, no solo de la reserva.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

- Realizar una primera aproximación al comportamiento hidrológico de la Reserva Natural del Bosque Mbaracayu que permita disponer de información para iniciativas de manejo y gestión integral del recurso hídrico.

2.2. Objetivos específicos

- Determinar las características del régimen hídrico de la Reserva Natural del Bosque Mbaracayu según cartografía y zona climática.
- Estimar la producción de agua de la Reserva Natural del Bosque Mbaracayu mediante modelación hidrológica.
- Elaborar una zonificación de la distribución espacial y temporal del agua dentro de la Reserva Natural del Bosque de Mbaracayu.

3. REVISIÓN LITERARIA

Paraguay es un país rico en recursos hídricos, cuenta con una buena cantidad de cauces hídricos superficiales y reservorios de aguas subterráneas. A esto cabe agregar que la distribución de estas aguas está condicionada por la geomorfología de las dos principales regiones del país; divididas por el Río Paraguay; la Oriental y Occidental, como así también sumando las variables climáticas que son muy marcadas en ambas regiones (Álvarez 2014). Estas condiciones geomorfológicas que forman tipos de suelos, determinan tipos de vegetación (Ecoregiones), y éstos a su vez están condicionados al clima.

El complejo ecorregional "Bosque Atlántico" es considerado un complejo de ecorregiones terrestres que recorre la costa atlántica de Brasil, y se extiende hacia el oeste por Paraguay oriental y el noreste de Argentina (Figura 1); siendo uno de los bosques tropicales lluviosos más amenazados de la tierra por su proceso de deforestación. La porción sudoeste constituye la ecorregión del Bosque Atlántico del Alto Paraná (BAAPA), dentro del cual se encuentra situada la RBBM, la cual anteriormente poseía una superficie de 47 millones de hectáreas y ahora se conserva solo el 5% del bosque original (Galluppi-Selich 2019)

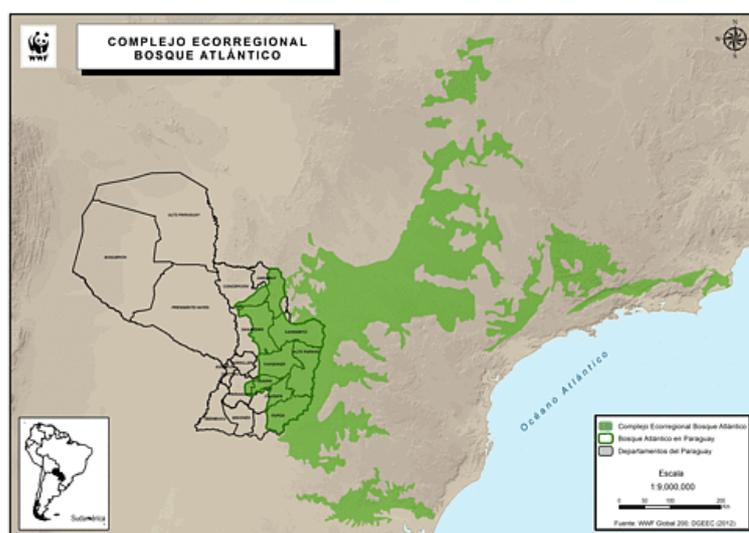


Figura 1: Ecorregión Bosque Atlántico

Fuente: http://www.wwf.org.py/_donde_trabajamos_/bosque_atlantico/

Dentro de este trabajo consideraremos exclusivamente la RBBM, donde se pretende estimar la producción de agua, sitio de importancia hidrográfica de carga y descarga del acuífero Guaraní; considerando que la misma se encuentra dentro de una zona con una fuerte presión antrópica debido al avance de la frontera agropecuaria, la construcción de infraestructura vial, y el crecimiento poblacional, generando impactos importantes de pérdida de conectividad ecosistémica, contaminación, y mal uso y gestión de recursos naturales; no en vano se menciona que sólo queda el 5% del BAAPA, siendo contemplado la RBBM dentro de ese porcentaje.

3.1. El ciclo hidrológico.

Al ciclo hidrológico se lo considera como el concepto fundamental de la hidrología. De las muchas representaciones que se pueden hacer de él, la más ilustrativa es quizás la descriptiva.

Como todo ciclo, el hidrológico no tiene ni principio ni fin (Figura 2); y su descripción puede comenzar en cualquier punto. El agua que se encuentra sobre la superficie terrestre o muy cerca de ella se evapora bajo el efecto de la radiación solar y el viento. El vapor de agua que así se forma se eleva y se transporta por la atmósfera en forma de nubes hasta que se condensa y cae hacia la tierra en forma de precipitación. Durante su trayecto hacia la superficie de la tierra el agua precipitada puede volver a evaporarse o ser interceptada por las plantas o las construcciones, luego fluye por la superficie hasta las corrientes o se infiltra. El agua interceptada y una parte de la infiltrada y de la que corre por la superficie se evapora nuevamente. De la precipitación que llega a las corrientes, una parte se infiltra y otra llega hasta los océanos y otros grandes cuerpos de agua, como presas y lagos. Del agua infiltrada, una parte es absorbida por las plantas y posteriormente es transpirada, casi en su totalidad, hacia la atmósfera y otra parte fluye bajo la superficie de la tierra hacia las corrientes, el mar u otros cuerpos de agua, o bien hacia zonas profundas del suelo (percolación) para ser almacenada como agua subterránea y después aflorar en manantiales, ríos o el mar (Birkel 2019).

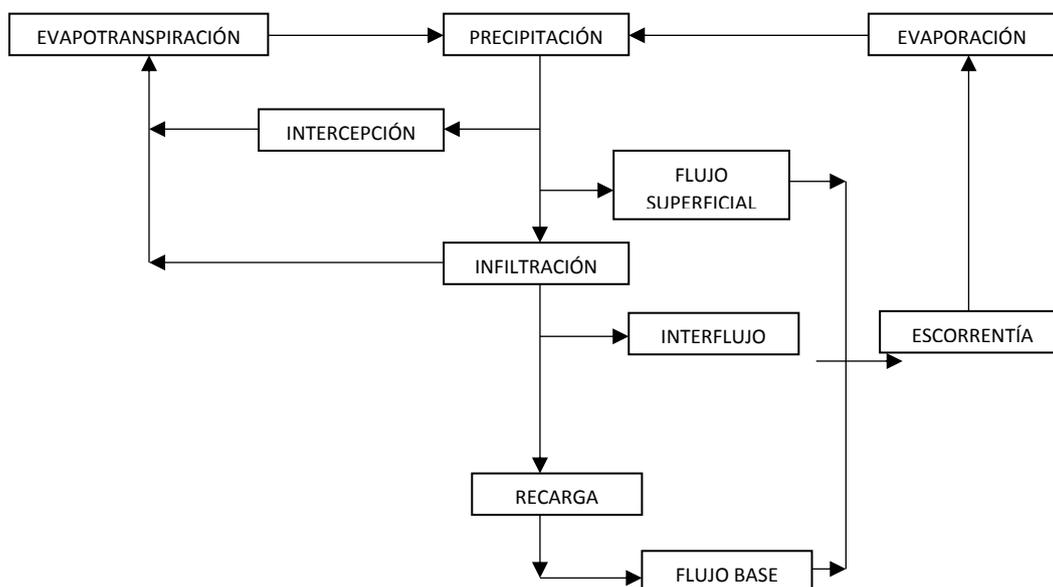


Figura 2: Representación simplificada del ciclo del agua
Fuente: Carvajal 2017

3.2. La Hidrología y su importancia

Se denomina hidrología a la ciencia que estudia el agua superficial y subterránea, sus relaciones con la atmósfera y sus factores naturales. De ahí que se pueden distinguir hidrología superficial e hidrología subterránea. Mientras que el concepto agua, debe entenderse como el elemento que puede encontrarse en diferentes estados: sólido, líquido, gaseoso y plasma. La hidrología se deriva etimológicamente de dos palabras griegas; hidro que significa agua y logos que significa tratado o estudio.

La hidrología considera los flujos y reservorios de agua de todo el ciclo hidrológico desde los océanos a la atmósfera, la vegetación, los suelos, y la geología. Por lo tanto, la hidrología se entiende como una ciencia holística o integral del agua.

La importancia y estudio de la hidrología radica fundamentalmente en el planeamiento del uso de los recursos hídricos en términos de cantidad y calidad de agua; por ello ha pasado a ser elemento fundamental de los proyectos de ingeniería civil, agrícola, saneamiento, hidráulica; relacionados con el suministro de agua, la disposición de aguas servidas, drenaje, protección contra la acción de ríos y recreación. Por otro lado, la importancia del agua subterránea conduce a considerar de prioridad el desarrollar la hidrogeología que estudia a detalle las aguas subterráneas.

Debido a la complejidad de los fenómenos naturales que intervienen en los procesos hidrológicos, puede ser difícil examinarlos mediante un razonamiento deductivo riguroso y en la práctica se mezclan métodos empíricos con físicos. Sin embargo, la hidrología como cualquier ciencia natural adhiere a las leyes físicas fundamentales.

3.3. Interrelación, importancia e implicancia de la intervención antrópica en el ciclo hidrológico.

El uso de la tierra, la sobreexplotación del agua subterránea y las prácticas de disposición de efluentes y desechos en un medio urbano conducen a modificaciones significativas del ciclo hidrológico tanto en sus términos de cantidad como de calidad. En forma general estos efectos se traducen en la reducción de la infiltración natural de las aguas pluviales, con la consiguiente disminución de la evapotranspiración y el aumento del escurrimiento superficial (Figura 3).

Además, puede verse deteriorada la calidad química por vertidos de efluentes en el agua superficial, disposición de desechos y contaminación del agua subterránea (lixiviados). Cabe resaltar que hasta hace pocos años se aceptaba que las zonas urbanas

reducían la cantidad de recarga al agua subterránea debido a la impermeabilización de las superficies. Sin embargo, las pérdidas de las cañerías de aprovisionamiento de agua, de los drenajes pluviales y cloacas pueden incrementar la alimentación a los acuíferos. Uno de los factores que alteran el ciclo del agua es la destrucción de los bosques. Los árboles retienen parte del agua lluvia y permiten su evaporación antes de que llegue al suelo. También amortiguan la caída del líquido, haciéndola más lenta y permitiendo que alguna parte de este no corra directamente a los ríos, sino que penetre en el suelo (infiltración). Una vez allí, pasa a formar parte de los acuíferos (reservas subterráneas de agua, que alimentan los ríos en el verano, contribuyendo a garantizar la disponibilidad del recurso) (Birkel 2019).

También contribuye a su alteración la sedimentación de los ríos, ciénagas y humedales, ya que reduce su capacidad para almacenar volúmenes importantes de agua. Como consecuencia, no solo aumentan las inundaciones, sino también la cantidad de agua contribuyente a los ríos.

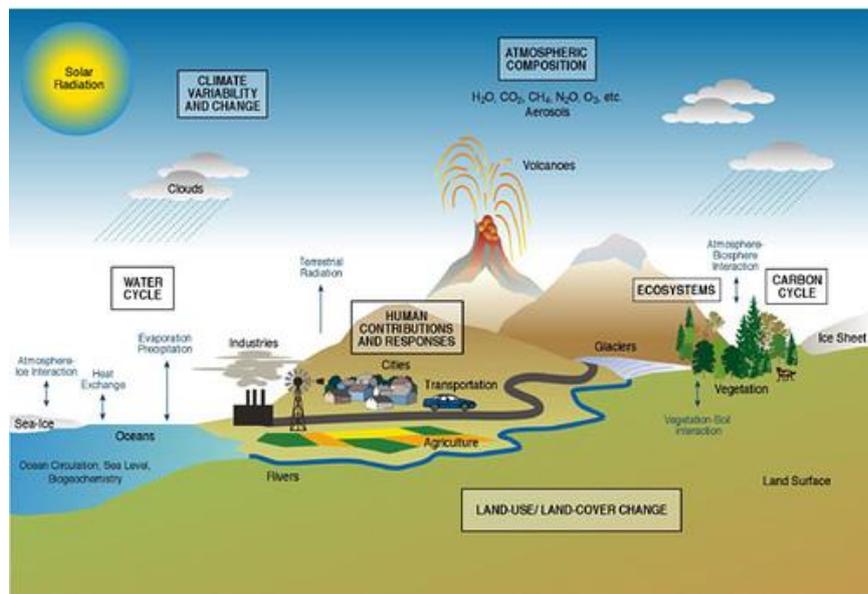


Figura 3: Ciclo hidrológico ante el cambio climático
Fuente: US Climate Change Science Program

3.4. Balance hídrico

El Balance Hidrológico o Balance Hídrico, es la cuantificación tanto de los parámetros involucrados en el ciclo hidrológico, como de los consumos de agua de los diferentes sectores de usuarios, en un área determinada, cuenca, y la interrelación entre ellos, dando como resultado un diagnóstico de las condiciones reales del recurso hídrico en cuanto a su oferta, disponibilidad y demanda en dicha área. Dado que el balance hidrológico presenta un diagnóstico de las condiciones reales del recurso hídrico en un área en particular, permite tomar medidas y establecer lineamientos y estrategias para su protección y utilización de una manera integrada, de tal forma que se garantice su

disponibilidad tanto en cantidad como en calidad. El modelo conceptual de balance hídrico se basa en la ecuación de conservación de masa (Figura 4):

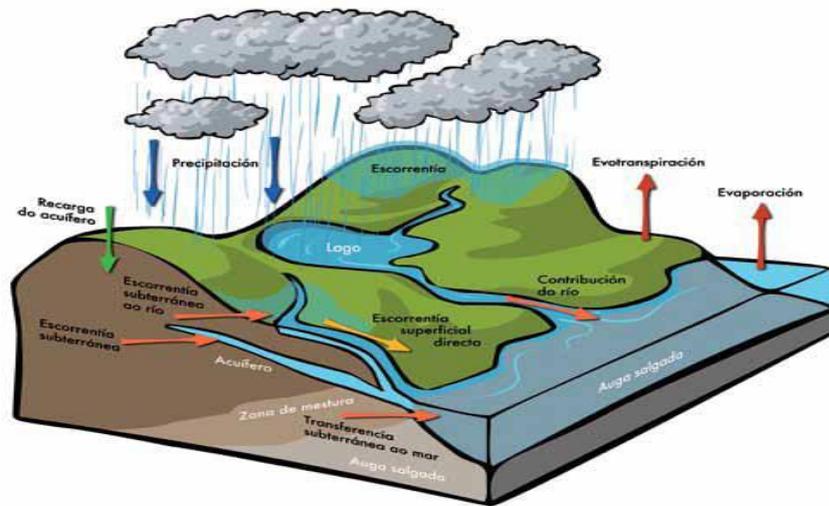


Figura 4: Esquema de un balance hídrico

El balance hidrológico ayuda a determinar la disponibilidad de agua en el tiempo y espacio, y siempre se utiliza para identificar el conflicto de déficit o falta de agua si esta se compara con la demanda. El agua disponible y su correlación con la escurrimiento, caudales disponibles y tipos de cobertura de la cuenca se pueden apreciar gráficamente en los hidrogramas anuales, mensuales, semanales o diarios (Birkel 2019).

Es importante resaltar que el balance de agua es afectado por las condiciones climáticas y los cambios en el uso del suelo, que influyen en la infiltración y la percolación, procesos que determinan los caudales máximos, la retención de humedad del suelo y la regulación hídrica (Brujinzeel 2010).

En el caso de una cuenca cubierta densamente con bosques naturales, vegetación permanente y áreas de cultivo bien manejadas, presenta un hidrograma bien distribuido (los caudales disponibles se distribuyen en varios meses), en cambio las cuencas con poca cobertura vegetal y mal manejadas, presentan hidrogramas con "picos muy altos" (los caudales disponibles se concentran en pocos meses y son muy altos, generando inundaciones) (Birkel 2019).

3.5. Modelos hidrológicos

A escala de cuenca la producción de escurrimiento involucra una compleja interacción de procesos físicos y químicos que operan a diferentes escalas espaciales y temporales. Estas interacciones han sido estudiadas en las regiones tropicales y permiten comprender la importancia de la estimación de la escurrimiento a partir de modelos hidrológicos de simulación continua (Celleri 2009).

La selección objetiva del modelo es un paso crucial en la modelación para predecir con exactitud caudales y otras variables y entender las respuestas de las cuencas

hidrográficas (Clark 2008). Para un análisis de caso en particular el propósito del estudio, el modelo y la disponibilidad de datos son los factores que determinan la selección (Ocampo 2014).

Los modelos conceptuales de balance hídrico a escala mensual pretenden simular los procesos hidrológicos por la conceptualización de la cuenca como un conjunto de tanques interconectados, a través de los cuales el agua pasa de la entrada como lluvia a la salida como caudal; las ecuaciones de control satisfacen los requerimientos de balance de agua (Tomas 1981). Existen distintos tipos de modelos hidrológicos que hoy día se utilizan y aplican acorde a los estudios que uno precisa realizar. Por citar algunos podemos mencionar; modelos de distribución paramétrica para estimar la producción de sedimentos y nutrientes en tierras agrícolas, modelos físicamente basado y distribuido que simula la respuesta hidrológica de una cuenca sujeta a un campo de lluvia que simula hidrología y erosión, modelos físico y espacial para representar los procesos físicos de una cuenca, y otros como modelos espaciales de distribución basados en procesos físicos. Para el presente trabajo se centran en SWAT específicamente.

4. METODOLOGÍA

4.1. Área de estudio

El área de estudio se encuentra dentro de los límites de la Reserva de Biósfera del Bosque Mbaracayú (RBBM) (Figura 5), ubicada al noreste de la Región Oriental en el Departamento Canindeyú, entre los 24° 00' y 24° 15' de latitud Sur y 55° 00' y 55° 32' de longitud Oeste. Está ubicada en los municipios de Villa Ygatimi, Curuguaty, Corpus Christi, Yvy Pyta, Yvyrarobana Ypejhu.

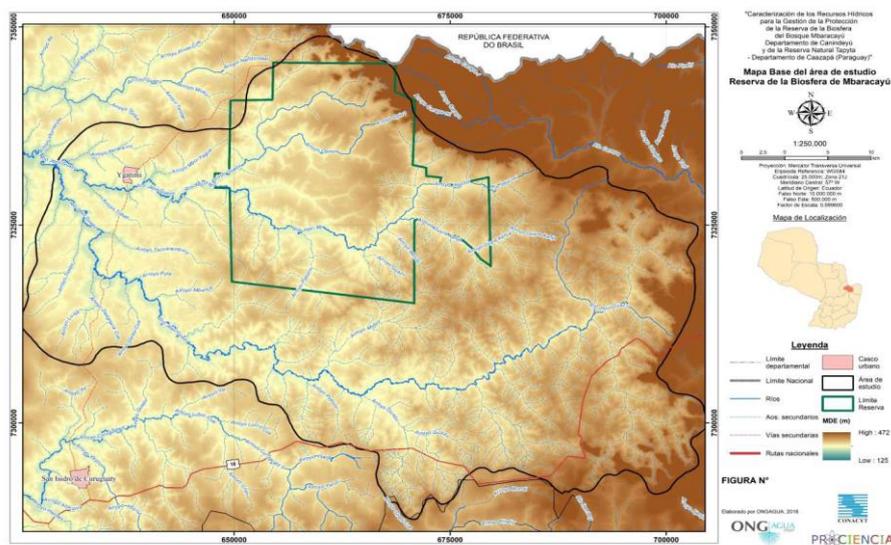


Figura 5: Mapa de base del área de la Biosfera de la RNBM en el Departamento de Canindeyú con la CARJ.
Fuente: Fundación Moisés Bertoni

4.1.1. Clima

Considerando el aspecto climático de la RBBM, la temperatura media oscila entre los 21 y 22° C., registrándose heladas entre los meses de junio y octubre. Existe un comportamiento de estacionalidad bastante estable, marcado, este comportamiento puede visualizarse en los datos históricos tanto en las temperaturas como en las precipitaciones. Existen dos estaciones bien diferenciadas: una seca y fría, y otra húmeda y calurosa, registrándose grandes variaciones diarias de temperatura. La precipitación media anual es de 1.800 mm, registrándose la mayor cantidad de lluvias entre los meses de octubre y marzo. Las precipitaciones pueden variar año a año, alcanzándose en la reserva valores superiores a los 2.000 mm e inferiores a los 1.600 mm. Se estima que la evapotranspiración potencial es de 1100-1200 mm anual (Fariña 2019).

4.1.2. Características del suelo

Burgos & Rodas (2001) apud Golin, (2014), mencionan en su trabajo "Suelos y Paisajes del Mbaracayú", realizado en la Reserva del Mbaracayú, que los suelos procedentes de areniscas pertenecen al orden Ultisol y tienen un paisaje de lomadas, sin rocosidad y con buen drenaje. Mientras que los demás suelos pertenecen a los órdenes Entisol, Anfisol y Oxisol. Los Entisoles se observan en suelos poco profundos, con drenaje excesivo y moderada rocosidad, en tanto que los Alfisoles se sitúan en las planicies de inundación de ríos y arroyos, con un drenaje pobre, sin rocas y con relieve plano. Los Oxisoles presentan un relieve plano, buen drenaje y sin rocas (Fariña 2019).

Estas características de suelo pueden ser apreciadas o expresadas en los distintos tipos de vegetación que se encuentra en toda la superficie de la Reserva. Cuenta con una gran variedad de paisajes naturales como bosques húmedos, semi húmedos, cerrados, cerradones y sabanas hidromórficas (Céspedes, et al. 2007).

4.1.3. Topografía

La topografía del lugar es bastante accidentada; con presencia de paisajes como cerrados, cerradones, praderas húmedas; y la elevación más destacada es la Cordillera de Mbaracayú, siendo la cota mínima de 120 m y la cota máxima de 460 m. La forma predominante en el paisaje regional y local lo constituyen las colinas sedimentarias correspondientes a las serranías de Amambay –Mbaracayú. Son características las lomadas o vertientes (Larroza 2006). La zona de estudio presenta elevaciones entre 100 y 500 msnm, entre el punto más bajo y más alto respectivamente (Figura 6).

Esta región presenta una topografía muy variada; 64.405 ha. de superficie; tiene como consecuencia diversidad de paisajes, como se mencionó anteriormente dentro del mismo documento, acompañado de suelos variados que lo hacen una zona heterogénea y particular en todo el Paraguay. Las características de tipo de suelo son determinantes

a la hora de correr el modelo y para poder llegar a los objetivos establecidos dentro del estudio.

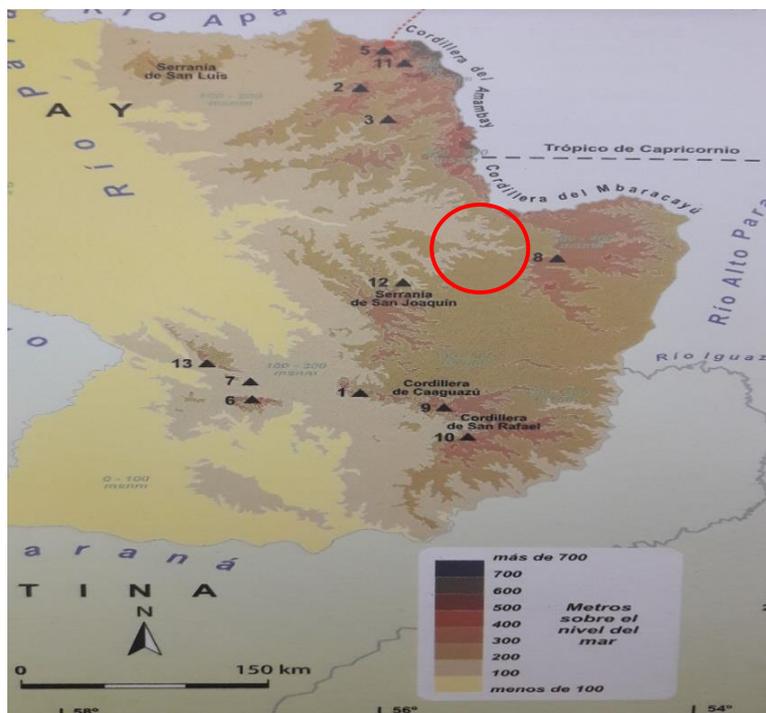


Figura 6: Orografía de la Región Oriental – Paraguay

Fuente: Naumann, C; Coronel, M. 2008.

4.1.4. Hidrografía

El principal curso hídrico ubicado dentro de la RNBM y área de influencia es el Río Jejuí; que termina uniéndose con el Jejuí Guasú al oeste del mismo, para luego formar el Río Jejuí, este último es tributario del Río Paraguay. El Río Jejuí tiene como afluentes los arroyos Guasú, Opivo, Moroti, Guyra Kejha, Pypukú y Bandera; todos ellos, también ubicados dentro de la reserva.

Al extremo noreste del área de la reserva se encuentra la cuenca del arroyo Karapá que discurre en dirección este y es tributario del Río Paraná. Estas dos cuencas, el Río Jejuí y el arroyo Karapá son considerados dentro del trabajo.

En la parte central de la reserva se encuentran varios cuerpos lagunares de forma lenticular y de diferentes tamaños; también son considerados dentro del trabajo.

4.2. Modelación hidrológica con SWAT

El modelado hidrológico de cuencas es una herramienta que permite dar a conocer la cantidad y calidad de agua de una cuenca, hacer pronóstico del recurso hídrico en los

años próximos y analizar las interacciones entre la producción de escorrentía y los procesos físicos y químicos que operan en el nivel de cuenca, a diferentes escalas espaciales y temporales. Estos modelos son utilizados con el fin de hacer simulaciones para la predicción basados en procesos de hidrología y erosión (Torres-Benites 2004).

SWAT permite la simulación de un gran número de procesos físicos en la cuenca. Ésta es fraccionada en varias subcuencas a través de un valor de área umbral, que dependerá del objetivo y exactitud del estudio, dichas subcuencas poseen una posición geográfica determinada y están relacionadas con las vecinas. Las subcuencas se dividen en unidades de respuesta hidrológica (HRU) que conforman una combinación única de tipos de suelo, usos y cobertura, de forma que cada subcuenca posee al menos una HRU. La subdivisión de la cuenca permite al modelo reflejar diferencias en la evapotranspiración para varios tipos de suelos y coberturas. La escorrentía se predice separadamente para cada HRU y es canalizada en función del modelo digital del terreno para obtener el total en la cuenca. Esto aporta una mayor precisión en la descripción física del balance de agua (Birkel 2019).



Figura 7: Esquema de trabajo con datos SWAT
 Fuente: Ney Ríos

Es razonable partir de una serie de datos medidos, analizarlos y tratar de establecer la norma que gobierna los procesos, para un análisis hidrológico consistente se recomienda usar series de datos lo más largos disponibles para cada estación de medición. La zona de estudio no cuenta con estaciones meteorológicas y tampoco con estaciones cerca. Dichos insumos fueron extraídos de web de SWAT, Datos meteorológicos globales para SWAT, el cual permite descargar datos diarios del Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) en formato del mismo para una ubicación y un periodo determinado; los datos extraídos y con los cuales se trabajó fueron de temperatura y precipitación de 1979 a 2014. Los demás insumos cartográficos, como cobertura hídrica, uso de suelo, suelos, modelo de elevación y la capa de la reserva fueron suministrados por la Fundación Moisés Bertoni.

En cuanto a la capa de cobertura hídrica, se procedió de manera objetiva a delimitar la cuenca (929.9 Km²) a nivel de la superficie de la RNBM, debido a la magnitud de la superficie de la cuenca del Río Jejuí, aproximadamente 22.500 km². Bajo esta delimitación se elaboró este trabajo.

Según Carvajal (2017), el modelo SWAT hace simulación en tres pasos:

- 1) Delimitación de la cuenca, con la utilización del modelo de elevación digital (DEM) y de manera adicional se puede agregar la red hídrica;
- 2) Conformación de Unidad de Respuesta Hidrológica (HRUs), para lo cual emplea capas en formato ráster de tipos de suelos y usos de suelos y la pendiente generada a partir del MED;
- 3) Simulación, y para esto es necesario incorporar información climática por día. A partir de ello se puede calibrar el modelo con datos de salidas de la cuenca lo cual servirá como línea base.

4.2.1. Ecuación SWAT

La hidrología del modelo SWAT se basa en el criterio de que el agua entra, sale y se almacena como lo describe la ecuación:

$$SW_t = SW + \sum_{i=1}^t (R_i - Q_i - ET_i - P_i - QR_i)$$

Donde SW_t es el contenido de agua en el suelo el día t , SW Es el agua aprovechable por las plantas o el contenido de agua en el suelo menos el contenido de agua a 15 bar, t es el tiempo en días, R es la precipitación diaria, Q es la cantidad de escorrentía diaria, ET la evapotranspiración diaria, P la percolación diaria y QR el flujo de retorno o flujo base; todas las unidades son en mm.

La cantidad de escorrentía es estimada aplicando la metodología del número de la curva del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos, con datos de lluvia diarios. Esta ecuación se fundamenta en que la escorrentía está determinada por el suelo, la cobertura de suelo y la práctica de manejo que en este se realice.

El agua que penetra en el suelo o infiltración puede tomar varios caminos: incrementar la humedad del suelo en la zona radical, moverse sub superficialmente como flujo lateral hacia los canales de drenaje, recargar acuíferos poco profundos, donde esta agua también llegará hasta los canales de drenaje y recargar acuíferos profundos. El SWAT considera flujo lateral, percolación y flujo de retorno.

Las variables climáticas utilizadas por el SWAT son la precipitación, la temperatura del aire, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa. Si la precipitación y la

temperatura diaria están disponibles deben ser ingresadas directamente al modelo, si no, el generador de variables climáticas puede simular la temperatura y precipitación diaria. Para aplicaciones prácticas, se recomienda utilizar las simulaciones del simulador de clima como última opción.

La producción de sedimentos es calculada para cada unidad de respuesta hidrológica con la modificada ecuación de la pérdida universal del suelo (MUSLE):

$$Y = 11.8(V.qp)^{0.56} (K)(C)(PE)(LS)$$

Donde Y es la producción de sedimentos desde la subcuenca en t, V es el volumen de escurrimiento superficial para la subcuenca en m³, qp es la tasa de flujo pico en m³/s, K es el factor de erodabilidad del suelo, C es el factor de manejo, PE es el factor de práctica del control de la erosión y LS es el factor de longitud de inclinación.

5. RESULTADOS y DISCUSIÓN

5.1. Objetivo específico 1: Determinar las características del régimen hídrico de la Reserva Natural del Bosque Mbaracayu según cartografía y zona climática.

Si bien SWAT permite la simulación del balance hidrológico a diario, mensual y anual, el presente trabajo se basó en datos diarios, sin embargo, se optó por reportar los resultados mensuales y anuales, debido a la facilidad de manipulación e interpretación de los datos.

Se identificó 7 tipos de cobertura y 9 tipos de suelo que sirvieron de insumo para alimentar la base de datos de SWAT (Tabla 1). El tamaño total de las sub cuencas creadas (Figura 8); delimitada por SWAT, en base al DEM (Googel Earth Engine); pasan a tomar relevancia en sus delimitaciones ante la delimitación física de la reserva como punto de estudio, pudiéndose observar que el área es mayor (92.988 ha) que la reserva (64.404 ha). Para la generación de la capa hídrica se delimitó acorde al DEM, se asignó un umbral de delimitación de 50 Km². Todas las comparaciones y análisis están basadas en relación a las sub cuencas y otras en base a las coberturas. La delimitación de la reserva es punto de partida para poder delimitar la cuenta y así poder trabajar de manera objetiva.

Delimitación de subcuencas

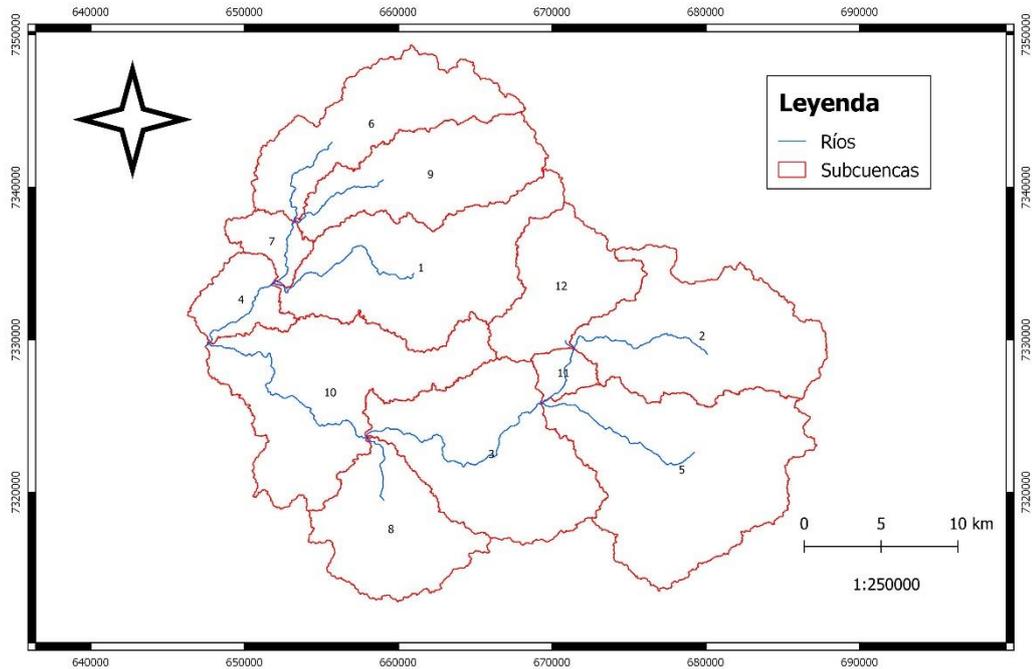


Figura 8: Delimitación de sub cuencas de la RNBM

La cuenca completa está comprendida por 12 sub cuencas. En la definición de las Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU), la cuenca se subdividió en 842 HRU, en un área de 929.99 Km². Es apreciable en la totalidad de la cuenca (Tabla 1), que los bosques y humedales son las mayores áreas y porcentajes según clasificación de suelos y cubiertas.

Si bien objetivamente hablamos de la RNBM como objeto de estudio, la misma cumple la función de referenciar el área de cuenca de estudio en la cual se encuentra la reserva. En los tipos de cobertura (landuse) identificados se aprecia la capa Agricultura (AGRL), siendo este contemplado por motivos que abarca áreas de agricultura que se encuentran fuera de las delimitaciones técnicas de la reserva.

Tabla 1: Proporción de tipo de suelo, coberturas y pendiente en relación a la cuenca de la RNBM.

Landuse/Soil/Slope Distribution		05 March 2020 15.46	
Number of subbasins: 12			

Watershed		Area [ha]	
		92998.61	

		Area [ha]	%Watershed

Landuse			
	WATR	44.56	0.05
	FRSD	59675.54	64.17
	FRST	12657.25	13.61
	AGRL	7897.82	8.49
	WETL	6409.48	6.89
	PAST	5913.79	6.36
	AGRR	400.17	0.43
Soil			
	ARP	53424.89	57.45
	AP	10287.29	11.06
	TP	11722.23	12.60
	RK	7466.86	8.03
	RKX	863.55	0.93
	WATER	13.96	0.02
	TM	12.33	0.01
	TQ	6850.69	7.37
	LH	2356.80	2.53
Slope			
	0-5.0	38815.27	41.74
	5.0-15.0	41177.32	44.28
	15.0-35.0	11722.36	12.60
	35.0-9999	1283.66	1.38

Partiendo de la base de datos hidrometeorológicos, obtenidos de la CFSR, se ingresó en SWAT, periodos de tiempo de los años 1979 – 2014 (35 años) se obtuvo datos interesantes como premisa del objetivo principal del trabajo, el cual se modeló.

Según Collischonn & Dornelles, (2013); el balance entre entradas y salidas de agua en una cuenca hidrográfica es denominado balance hídrico. La principal entrada de agua de una cuenca es la precipitación. La salida de agua de la cuenca puede ocurrir por evapotranspiración y por escurrimiento superficial.

La precipitación media anual en la zona de estudio es de aproximadamente 988.8mm, como principal fuente de entrada de agua. Se estimó una evapotranspiración potencial anual (por método Hargreaves) de 1731.1 mm y la evaporación y transpiración es de 777.6mm, con una escorrentía superficial de 43.15mm y un flujo lateral de 61.23mm anual respectivamente. La disponibilidad de agua de las zonas no saturadas para las plantas es de 22.14mm, debido a la percolación de 100.72mm anual, a acuíferos poco profundo. De esta percolación tenemos un retorno de flujo de 72.76mm de agua anual a los cuerpos de agua en estudio. (Figura 9) La recarga en la napa del acuífero es de 5.04mm anual. Estos datos tienen una interpretación de régimen hídrico, o sea, comportamiento del agua en un periodo de tiempo determinado (1 año).

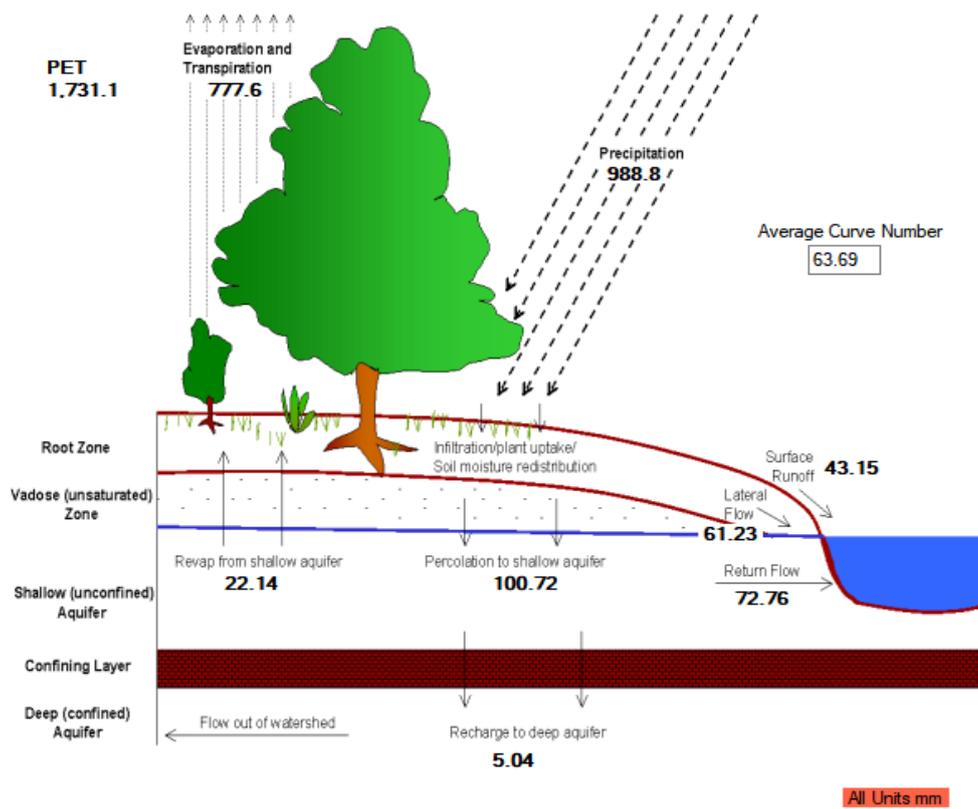


Figura 9: Balance hídrico de la RNBM

Como bien está citado en el Plan de manejo de la RNBM "el clima de la región es típicamente, clasificado según Koeppen como Templado Lluvioso" (Plan de manejo, 2005), así también clasificado por el sistema Holdridge como zona de Vida de Bosque Templado Cálido Húmedo, mientras que el sistema Thornwaite como tipo climático.

Acorde a la descripción climática citada podemos ver cierta relación en cuanto a la caracterización de zona lluviosa o húmeda, puesto que gran parte del año se presenta clima lluvioso, por otro lado, los meses de menor precipitación son de julio a septiembre (Figura 10), siendo agosto el menor (40.8mm), mientras que los meses más lluviosos son en mayo y octubre. Según Fariña y Larroza (2019), las precipitaciones pueden variar año a año.

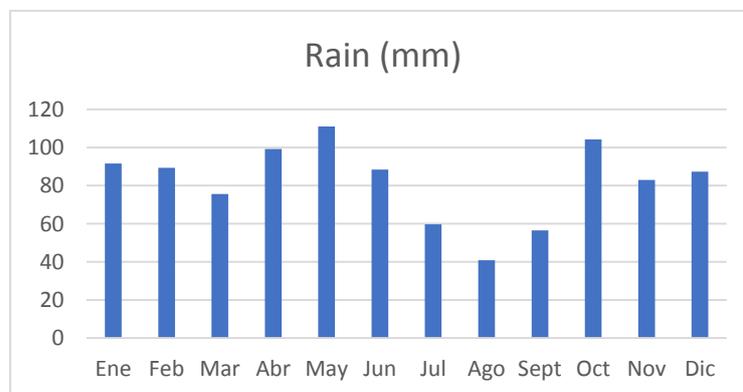


Figura 10: Hidrograma de la RNBM

5.2. Objetivo específico 2: Estimar la producción de agua de la Reserva Natural del Bosque Mbaracayu mediante modelación hidrológica.

Es importante aclarar, dentro de una modelación hidrológica que la producción de agua; dentro del reporte de salidas; es la suma de los escurrimientos superficiales (SURQ) y subsuperficiales (LATQ y GWQ), menos las pérdidas por transmisión (TLOSS) y las abstracciones de los almacenamientos (WYLD = SURQ + LATQ + GWQ - TLOSS - IRR - SA_IRR - DA_IRR) (Torres, E. et al. 2004).

Tabla 2: Valores promedio mensuales de la cuenca

Mon	Rain (mm)	Surf Q (mm)	Lat Q (mm)	Water Yield (mm)	ET (mm)	Sed. Yield (mm)	PET (mm)
Ene	91.58	3.61	5.09	14.45	51.09	0	215.69
Feb	89.34	3.48	6.85	16.34	61.36	0.39	170.64
Mar	75.61	2.21	3.97	13.2	87.92	0.2	169.03
Abr	99.22	6.71	6.05	18.93	74.71	0.39	121.78
May	110.99	5.16	6.42	18.96	61.15	0.19	84.13
Jun	88.37	4.22	7.49	20.49	45.63	0.16	66.54
Jul	59.71	1.93	5.64	17.42	41.82	0.08	76.12
Ago	40.8	1.28	3.1	11.42	54.87	0.06	106.07
Sept	56.53	2.87	2.28	9.72	64.64	0.14	136.97
Oct	104.24	3.98	5.2	13.24	88.47	0.23	174.87
Nov	83	3.81	4.26	13.23	83.93	0.24	192.82
Dic	87.34	3.78	4.63	13.94	62.32	0.21	218.12

Conforme a los reportes de salida obtenidos por SWAT podemos decir que la generación de agua de la cuenca es de 15.11mm promedio anual. La tabla 2 muestra una distribución temporal de la generación promedio de agua mensual, siendo junio el mes que más agua genera.

Siguiendo con la congruencia de datos, obtenemos datos espaciales de generación de agua en la cuenca; siendo las sub cuencas 2, 5 y 11 (Figura 11) las que más agua generan en toda la cuenca. Todo esto está directamente relacionado acorde al suelo y uso de suelo que se generó en las distintas HRU por cada sub cuenca. No obstante, dichas sub cuencas no son las que tienen mayores caudales, difiriendo en este aspecto y formando parte de un análisis crítico a tener en cuenta para planes de gestión y conservación de recursos hídricos.

Tabla 3: Valores de generación de agua por sub cuencas.

Subbasin	AREAKm ²	WYLDmm
1	112	128.0096313
2	108	308.5176312
3	112	137.5686289
4	25	136.0340758

5	148	311.0477699
8	76	146.4774588
7	15	136.9707005
8	70	143.7170926
9	76	120.224622
10	120	97.09862471
11	11	255.6177994
12	58	175.7327981

Téngase en cuenta que las combinaciones únicas de tipo de suelo y cobertura dan una respuesta determinada ante las precipitaciones que nos permiten tener resultados que guardan congruencia entre todos los datos de salida generados por SWAT. Las sub cuencas 2 genera 308,01mm, la 5 genera 311.04mm y la sub cuenca 11 genera 255.61 mm anual respectivamente (Tabla 3). Esto depende directamente del área de cada sub cuenca analizada por el software.

La reserva tiene una generación de agua muy importante en toda su superficie. Posterior a la sub cuenca que más genera, las demás tienen similitud y podemos afirmar de esta forma que es bastante homogénea. La sub cuenca 10 es la que menos agua genera (97.09mm anual) pero, a su vez es la que mayor caudal tiene (Tabla 4) en toda la cuenca.

En el presente trabajo no se contempla de manera minuciosa las zonas de recarga y descarga del acuífero en el que se encuentra la reserva. Este dato puede dar un resultado más preciso y real a todo el análisis.

Generación anual de agua

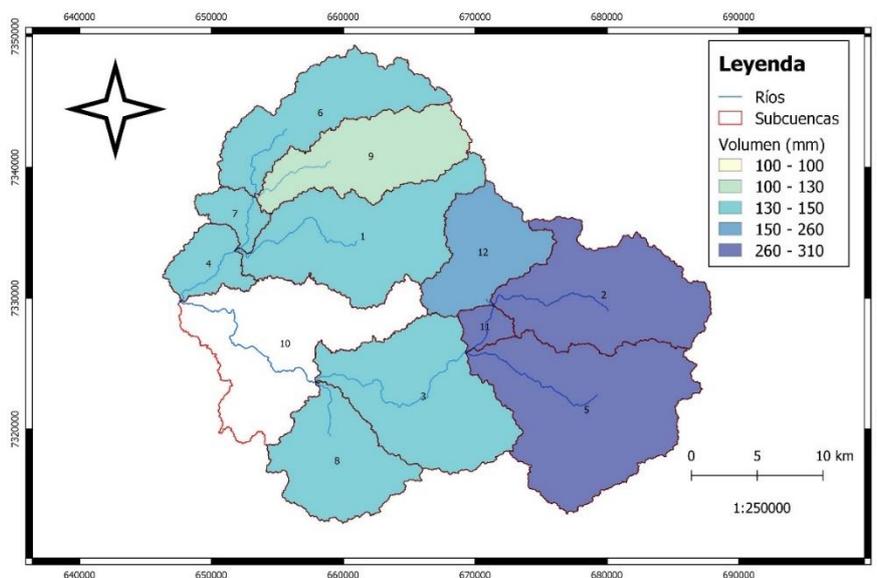


Figura 11: Generación de agua por sub cuenca

5.3. Objetivo específico 3: Elaborar una zonificación de la distribución espacial y temporal del agua dentro de la Reserva Natural del Bosque Mbaracayu.

En una distribución espacial de toda la cuenca delimitada se aprecian los ríos que tienen mayor caudal (Figura 12). Para este punto es importante aclarar que los resultados obtenidos por sub cuenca son anidados, es decir, son resultados independientes que se relacionan directamente acorde a la cobertura, tipo de suelo y pendiente. Entre todas podemos mencionar que las sub cuencas 3 y 10 son las de mayor caudal dentro del periodo anual, siendo 40.235 m³/s y 62.621 m³/s respectivamente; con pendiente bastante diferenciadas a las otras sub cuencas, como así también del área (Tabla 4).

Tabla 4: Tabla de flujo de agua por sub cuenca.

Subbasin	PenWidth	AREAKm ²	FLOW_OUTm ³ /s
1	1.33812404	112	5.323214032
2	1.31782078	108	12.59317344
3	2.64882412	436	40.23576465
4	2.19152336	304	14.81989563
5	1.52793916	148	17.36581376
6	1.12526682	76	4.187875498
7	1.62212398	167	8.330028181
8	1.08567358	70	3.811312079
9	1.12293993	76	3.416219583
10	4.00000000	930	62.62157913
11	1.66498848	176	17.42270965
12	1.00000000	58	3.876175396

Cabe recordar, según modelación figura 10, que las temporadas de menor lluvia son entre julio y septiembre, mientras que los de mayor precipitación son abril, mayo y octubre, época que los caudales pueden llegar al volumen estimado. Se observa cierta relación con el informe técnico de clima de la reserva, mostrándose como una zona húmeda y lluviosa, no así en el volumen de precipitación. *Existe un comportamiento de estacionalidad bastante estable, marcado, este comportamiento puede visualizarse en los datos históricos tanto en las temperaturas como en las precipitaciones* (Fariña 2019).

Caudal promedio anual

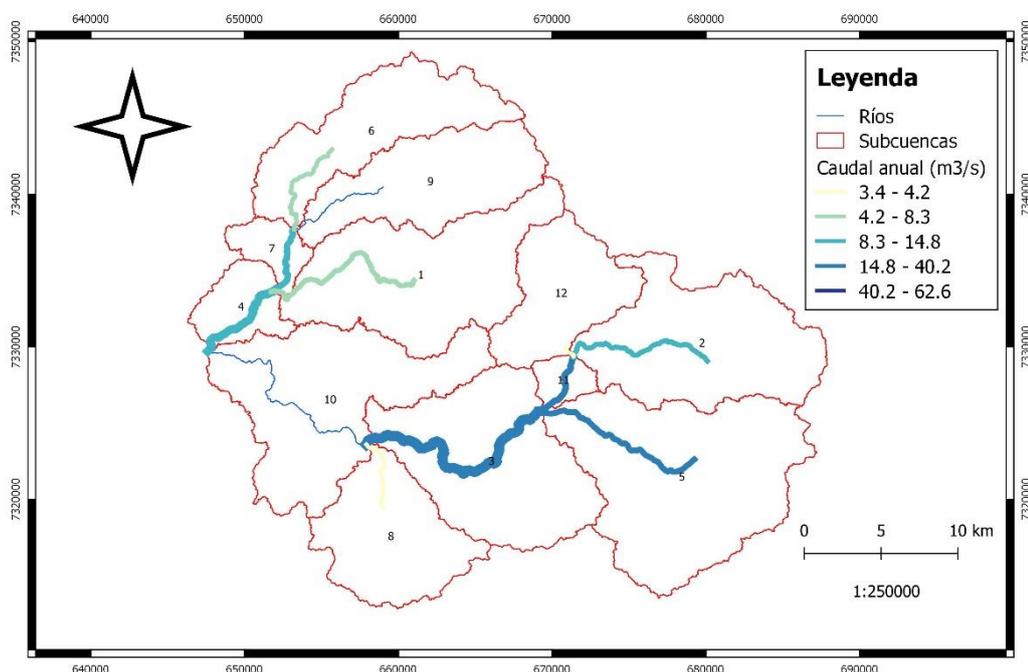


Figura 12: Caudales de las sub cuencas de la RNBM

El comportamiento hídrico, tanto espacial y temporal están determinados por varios factores, uno de esos factores es el uso de suelo o cobertura. La mayor cobertura está dada por los bosques, pasturas, humedales y cuerpos de agua, siendo estos la diversidad de área que tiene la RNBM, mientras que los tipos de agricultura que figuran son lo que se encuentra fuera de la delimitación física de la reserva. El agua que figura en la cobertura hace referencia a dos cuerpos naturales de agua lenticas permanente que se encuentra en el medio de la reserva.

Se observó que la precipitación es homogénea en toda la superficie total de la cuenca de estudio, la disponibilidad de agua para las plantas (AWC) es mayor en la reserva, el caudal superficial es estable y homogéneo dentro de la misma, habiendo cierta discrepancia con la agricultura. El agua de aporte a los caudales principales de parte de los acuíferos superficiales (GWQ) es importante dentro del ecosistema de la reserva, mientras que la evapotranspiración es mayor en el bosque denso (FRSD) y por razones obvias la de los cuerpos de agua (Tabla 5).

Tabla 5: Comportamiento hídrico mensual según cobertura.

LULC	AREAKm ²	AWC mm	PREC mm	SURQ mm	GWQ mm	ET mm
AGRL	78.98	383.86	1,006.25	177.92	156.81	630.31
AGRR	4	145.29	1,009.56	201.8	200.85	560.67
FRSD	596.67	439.07	983.41	22.26	95.78	836.37
FRST	126.57	253.84	1,003.80	21.72	206.16	733.24
PAST	59.14	358.53	1,005.17	103.8	227.56	627.7

WATR	0.45	389.9	986.84	0	0	1,427.61
WETL	64.09	379.74	971.73	48.41	229.69	646.82

5.3.1. Datos observados de caudal

Si bien no contamos con datos observados de caudal de los principales ríos de la zona para poder cargar y calibrar los resultados de la simulación, podemos tener como primer registro estas mediciones de caudal en un periodo determinado a modo de práctica.

Se realizó visitas por un periodo de 3 meses, una vez al mes para tomar medidas de caudal de 4 cuerpos principales de agua. Se tomaron medida de caudal con el método por flotador, promediando 10 tiempos consecutivos en una distancia de 10 metros entre persona y persona. Acorde al ancho de cada cuerpo de agua de promedio el área de corte para así poder determinar los caudales en m³/seg. Los cuerpos de agua estudiados en ese periodo de tiempo son los siguientes:

- Arroyo karapa: UTM 21K 0665903 7345134
- Río Jeju'imi: UTM 21J 0649387 7330318
- Arroyo Guasu: UTM 21J 0648095 7330948
- Arroyo Moroti: UTM 21J 0660331 07328422



Figura 13: Ubicación espacial de los cuerpos de agua observados.

El monitoreo se inició en octubre de 2019 previo análisis hídrico para la selección de los arroyos y ríos a medir. Se consideraron los criterios de accesibilidad, distancia y tamaño; para poder trabajar con el método de flotador. El monitoreo total se realizó siempre en un tiempo de duración de 2 días por visita. El mes de octubre fue un periodo de tiempo seco, entrando de manera gradual el periodo de lluvias, empezando a tener

caudales un poco más altos en noviembre, mientras que en diciembre las profundidades, ancho y caudal aumentaron considerablemente hasta impedir que uno de los cuerpos (Arroyo Guasu) pueda ser medido (Tabla 6).

Tabla 6: Caudales de arroyos y río observados.

FECHA	ARROYO / RÍO	CAUDAL (m³/s)
12/10/2019	Río Jejui'mi	3.26508
	Arroyo Moroti	0.07744
	Arroyo Guasu	1.44058
13/10/2019	Arroyo Karapa	0.21248
16/11/2019	Río Jejui'mi	5.21528
	Arroyo Moroti	0.08448
	Arroyo Guasu	1.94945
17/11/2019	Arroyo Karapa	0.38501
28/12/2019	Río Jejui'mi	11.12262
	Arroyo Moroti	0.13322
	Arroyo Guasu	No se pudo medir
29/12/2019	Arroyo Karapa	0.932667

Acorde a las coordenadas de los arroyos y ríos estudiados, se observa dentro de la capa hídrica generada por SWAT acorde al DEM el río Jejui'mi (sub cuenca 10). Este cuerpo de agua es el de mayor caudal en comparación a las otras tres medidas, el cual guarda relación con la modelación. Sin embargo, no se puede concluir que el volumen se asemeja o aleja a lo obtenido por razones de escasos de datos observados, pero si tiene la seguridad de la calidad del trabajo de modelación en congruencia con los datos ingresados a SWAT.

6. CONCLUSIÓN

Según manual SWAT, se sabe que la simulación hidrológica con este modelo se puede dividir en dos partes: la fase terrestre del ciclo hidrológico, que controla la cantidad de agua, sedimentos y pesticidas transportados hacia el canal principal por cada subcuenca; y la fase de circulación del agua, que comprueba el movimiento del agua y sedimentos a través del canal principal hasta el sitio de descarga de la cuenca. En el presente trabajo solo se consideró el ciclo hidrológico, descartando por completo los datos de sedimentos y pesticidas transportados.

Si bien se aclaró que no se cuenta con una base de datos con la cual comparar y poder llegar a calibrar los datos reportados por SWAT, el mismo es un primer reporte de aproximación de comportamiento hídrico de la RNBM interpretando resultados espacio temporales.

Se han manejado datos acorde al tipo de suelo y uso de suelo en toda la cuenca de estudio, en los datos generales del balance hídrico se pueden diferenciar zonas o zonificar sub cuencas que arrojaron resultados particulares sobre el comportamiento hídrico en la reserva.

Tabla 7: Relación de proporciones del Balance hídrico en la cuenca de la RNBM

DATOS	PROPORCIÓN
Flujo de agua/Precipitación	0.18
Flujo base/Flujo total	0.76
Escorrentía superficial/Flujo total	0.24
Percolación/Precipitación	0.1
Recarga profunda/Precipitación	0.01
Evapotranspiración/Precipitación	0.79

En resumen, con respecto a la distribución de agua que ingresa a la reserva se puede afirmar que el 18% de las aguas de río corresponde a la precipitación. El flujo base corresponde al 76% del flujo total en los ríos, mientras que el 24% de la escorrentía superficial es del flujo total en los ríos. Solo el 10% de la precipitación percola y el 1% de precipitación pasa a recargar los acuíferos profundos. Y el 79% de agua es evapotranspirada del total de la precipitación anual, teniendo en cuenta las épocas precipitación, cantidad precipitada y comportamientos de sub cuencas acuerdo al caudal, generación de agua y evapotranspiración, observaciones tenidas en cuenta en este estudio.

Acorde a la capa de uso de suelo se pudo observar que la precipitación es homogénea en toda su superficie y presenta un clima lluvioso, suelo bastante húmedo con disponibilidad de agua suficiente para plantas, generando caudales hasta 60m³/s. No obstante, no coinciden los datos de media anual de precipitación de "registro" estimado (1800 mm) con la simulación (988.8 mm), siendo el de la simulación menor al registro de media anual estimado; así también la evapotranspiración estimada en informes (1100 – 1200 mm anual) no coincide con la simulación (777.6 mm anual).

Según datos generados por la simulación, la cuenca, en toda su superficie genera anualmente una importante cantidad de agua específicamente las sub cuencas 2, 3 y 11, mientras que las demás sub cuencas generan volúmenes muy similares; entre 120 y 170 mm de agua. En paralelo tenemos la evapotranspiración que arroja resultados de mayor agua evapotranspirada en las sub cuencas 1, 3, 8, 9 y 12 con un estimativo arriba de 800 mm anual, siendo la sub cuenca 5 (670 mm) la que menos evapotranspira.

Si bien se cuenta con datos de registros con precipitación anual estimada y escorrentía superficial, es importante resaltar que estos datos (2001) ya pasan a ser

obsoletos y debe existir una actualización debido al cambio climático, deforestación y crecimiento poblacional de la zona.

El éxito de la conservación y el uso sustentable de los recursos naturales se basa en gran medida en el adecuado conocimiento científico, por lo que la investigación y el monitoreo de los recursos de la reserva y la CARJ debe ser encarado con alta prioridad.

7. RECOMENDACIONES

- Se debe generar un registro continuo de precipitación y temperatura diaria en todos los puestos de guarda parques para poder alimentar la base de datos a futuras simulaciones y poder realizar calibraciones.
- Se recomienda instalar estaciones hidrometeorológicas para empezar a generar base de datos propias en vista que no existen estaciones cercanas a la RNBM.
- Se recomienda instalar equipos de medición de caudal. Dato que permitirá realizar ajustes a este primer informe y poder generar información precisa y actualizada.
- Al generar base de datos utilizar las mismas para un plan de manejo y gestión de la cuenca hidrográfica.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez, M. 2014. Disponibilidad hídrica del Paraguay. Centro internacional de investigaciones para el Desarrollo. 25p. (Serie Clima y Recurso, N°20).
- Birkel, C. 2019. Curso de Hidrología para el manejo de cuencas; Unidad 3. CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza). Turrialba, Costa Rica. 10p.
- Birkel, C. 2019. Curso de Hidrología para el manejo de cuencas; Unidad 4. CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza). Turrialba, Costa Rica. 23p.
- Bocel, J. 2016, Modelación hidrológica para evaluar los niveles de erosión hídrica y producción de sedimentos en diferentes usos y coberturas de la tierra y su efecto en la calidad del agua en la subcuenca del río San Francisco, cuenca del lago Atitlán, Guatemala. Tesis M Sc. Turrialba, Costa Rica. CATIE. 113p.
- Bruijnzeel, L. Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees? 2004. *Agric. Ecosystems and Environment*. 104(1):185-228.
- Burgos, S; Rodas, O. 2001. Suelos y Paisajes del Mbaracayú. Fundación Moisés Bertoni/Universidad Nacional de Pilar. Asunción. Paraguay. 48p.
- Cabrera, A; Willink, A. 1980. Biogeografía de América Latina. 2 ed. Secretaria General de la OEA. Serie Biologica. Monografía 13(6). 122p.
- Carvajal, D. 2017. Dinámica hídrica bajo condiciones cambiantes en la subcuenca del río Tempisque, cuenca del Tempisque, Guanacaste, Costa Rica. Tesis M Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE.88p.
- Celleri, R; Feyen, J. 2009. The hydrology of tropical Andean ecosystems: importance, knowledge status and perspectives. *Mount. Res. Development*, vol. 29:350-355.
- Di-Bitetti, M; Placci, G; Dietz, L. 2003. A biodiversity vision for the upper Paraná Atlantic forest ecoregion: Desinging a biodiversity conservation landscape and setting priorities for conservation action. WWF. Washington, D. C. 148p.
- Fariña, S; Larroza, F; Báez, J; Cabral, N; Romero, O; Mallen, G; Avalos, E. c2019. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt). Caracterización de los Recursos Hídricos para la Gestión de la Protección de la Biósfera del Bosque Mbaracayu (Departamento Canindeyu) y la Reserva Natural de Tapyta (Departamento de Caazapá) Paraguay. Asunción, Paraguay. 132p.
- FMB. 2005. Reserva Natural de Bosque Mbaracayu: Plan de manejo 2005-2010. Versión Corta. Segunda Edición. Fundación Moisés Bertoni para la Conservación de la Naturaleza- Asunción, Paraguay. 84p.
- García, E; Rodríguez, L; Bartrina, L; Velázquez, M; Fernández, F. 2004. Reserva Natural Privada Tapytá: Justificativa Técnica. Fundación Moisés Bertoni.
- Galluppi-Salich, T; Villalba, J; Salas-Dueña, D; Rodriguez, L. 2019. Análisis de la función ecosistémica "protección de acuífero por cobertura vegetal" en la Reserva de la Biosfera del Bosque Mbaracayú (Canindeyu, Paraguay). *Revista Sociedad Científica del Paraguay* 1(4):99-115.

- Golin, K. 2014. Caracterización de los Suelos del Departamento de Canindeyú, Paraguay. Trabajo de grado presentado, San Lorenzo, Paraguay, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de Asunción. 28p.
- Larroza, F; Fariña, S. 2005. Evaluación hidrológica y determinación de la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea en la Reserva de la Biosfera del Mbaracayu (Cuenca de Jejui – Dpto. de Canindeyu) Paraguay. Fundación Moisés Bertoni. Asunción, Paraguay. 107p.
- Neitsch, S., Williams, J., Arnold, J., Kiniry, J. 2011. Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009. Texas, United States of America, Texas Water Resources Institute. 618 p.
- Ocampo, O; Vélez, J. 2014. Análisis comparativo de modelos hidrológicos de simulación continua en cuencas de alta montaña: Caso río Chinchiná. Revista Ingenierías Universidad de Medellín 13(24)43-58.
- Pérez de Mora, M. 2016, Estudio Hidrológico de la cuenca del Río Ambato, Provincia de Tungurahua, Ecuador. Tesis de M Sc. Turrialba, Costa Rica. CATIE. 20p.
- Rodríguez, E. 2019. Análisis de sensibilidad en producción de agua y erosión hídrica bajo escenarios de cobertura vegetal y clima en la sección alta de la cuenca del río Yaque del Norte, República Dominicana. Turrialba, Costa Rica. CATIE. 102p.
- Thomas, H. 1981. Improved methods for rational water assessment report. US Water Resources Council. Washington DC.
- Torres-Benitez, E; Fernandez-Reynoso, D; Oropeza-Mota, J; Mejía-Saenz, E. 2004. Calibración del modelo hidrológico SWAT en la cuenca El Tejocote, Atlacomulco, Estado de México. Revista Terra Latinoamericana. 22:437-444.
- Vilchis-Mata, I; Khalidou, M; Franco-Plata, R; Diaz-Delgado, C. 2015. Modelación Hidrológica con base en estimaciones de precipitación con sensores hidrometeorológicos. Tecnología y Ciencia del Agua. 6(4):45-60.

9. ANEXO



Arroyo Guasu



Arroyo Karapa



Arroyo Moroti



Ri3 Jejuí'mi