

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA**

**Facultad de Recursos Naturales Renovables**

**Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental**



**SIMULACIÓN DEL MODELO BIDIMENSIONAL DE LAS INUNDACIONES  
FLUVIALES EN LA LLANURA DE INUNDACIÓN EN LA RESERVA NACIONAL  
PACAYA SAMIRIA, PERIODO 2018-2019**

**Tesis**

**para optar el título de:**

**INGENIERO AMBIENTAL**

**PRESENTADO POR:**

Bryan Santillan Tello

Tingo María – Perú

2022



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA  
Tingo Maria – Perú  
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES



**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N°011-2023-FRNR-UNAS**

Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 15 de diciembre de 2022, a horas 8:00 a.m. de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Recursos Naturales Renovables para calificar la Tesis titulada:

**“SIMULACIÓN DEL MODELO BIDIMENSIONAL DE LAS INUNDACIONES FLUVIALES EN LA LLANURA DE INUNDACIÓN EN LA RESERVA NACIONAL PACAYA SAMIRIA, PERIODO 2018-2019”**

Presentado por el Bachiller: **BRYAN SANTILLAN TELLO**, después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara **APROBADO** con el calificativo de **“MUY BUENO”**

En consecuencia, el sustentante queda apto para optar el Título Profesional de **INGENIERO AMBIENTAL** que será aprobado por el Consejo de Facultad, tramitándolo al Consejo Universitario para el otorgamiento del Título correspondiente.

Tingo Maria, 16 de febrero de 2023

Dr. **LUIS EDUARDO ORE CIERTO**  
**PRESIDENTE**

Ing. M.Sc. **FRANKLIN DIONISIO MONTALVO**  
**MIEMBRO**

Ing. M.Sc. **ABBY SOLANGE DA CRUZ**  
**RODRIGUEZ**  
**MIEMBRO**



Ing. M.Sc. **ERLE OTTO JAVIER BUSTAMANTE SCAGLIONI**  
**ASESOR**



**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA**  
**REPOSITORIO INSTITUCIONAL DIGITAL**  
(RIDUNAS)

Correo: [repositorio@unas.edu.pe](mailto:repositorio@unas.edu.pe)



“Año de la unidad, la paz y el desarrollo”

**CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N° 109 - 2023 - CS-RIDUNAS**

El Coordinador de la Oficina de Repositorio Institucional Digital de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, quien suscribe,

**CERTIFICA QUE:**

El trabajo de investigación; aprobó el proceso de revisión a través del software TURNITIN, evidenciándose en el informe de originalidad un índice de similitud no mayor del 25% (Art. 3° - Resolución N° 466-2019-CU-R-UNAS).

Facultad:


Facultad de Recursos Naturales Renovables

Tipo de documento:

Tesis	X	Trabajo de investigación	
-------	---	--------------------------	--

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE DE SIMILITUD
SIMULACIÓN DEL MODELO BIDIMENSIONAL DE LAS INUNDACIONES FLUVIALES EN LA LLANURA DE INUNDACIÓN EN LA RESERVA NACIONAL PACAYA SAMIRIA, PERIODO 2018-2019	Bryan Santillan Tello	<b>19%</b> <b>Diecinueve</b>

Tingo María, 02 de mayo de 2023

  
**Mg. Ing. García Villegas, Christian**  
Coordinador del Repositorio Institucional  
Digital (RIDUNAS)

# UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

Facultad de Recursos Naturales Renovables

Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



## SIMULACIÓN DEL MODELO BIDIMENSIONAL DE LAS INUNDACIONES FLUVIALES EN LA LLANURA DE INUNDACIÓN EN LA RESERVA NACIONAL PACAYA SAMIRIA, PERIODO 2018-2019

**Autor** : Bryan Santillan Tello

**Asesor** : Ing. MSc. Erle Otto Javier Bustamante Scaglioni

**Co asesor** : PhD. Christian Edson Frias Perez

**Programa de Investigación** : Gestión Ambiental

**Línea de Investigación** : Eventos Geoespaciales

**Lugar de Ejecución** : Universidad de Ingeniería y Tecnología – UTEC

**Duración del trabajo** : 6 meses

**Financiamiento** : S/3 058.50

FEDU : No

Propio : Si

Otros : Si

Tingo María – Perú

2022

## DEDICATORIA

Con mucho amor y cariño dedica mi tesis a mi madre Katty Tello Alava y mi padre Magno Santillan Trigoso; que me han forjado como persona y me han acompañado en todo mi camino. Gracias por ser mi soporte y guía de vida, por apoyarme y dirigirme en mi camino profesional.

A mis hermanos Karen, Jack, Mashiel, Wendy y Eddy, por brindarme sus consejos, su compañía, su respaldo y comprensión. Gracias por ser parte de mi vida.

A mi familia; por estar pendientes mi desarrollo y ser los pilares de mi formación como persona, gracias por acompañarme en mis alegrías y en los momentos difíciles, por sus consejos, su alegría y ánimo.

Al amor de mi vida Grecia Valdivia por apoyarme y acompañarme en todas las amanecidas que me llevó a culminar la tesis, por el apoyo moral y por su feedback como ing. ambiental que me compartió durante este proceso.

## **AGRADECIMIENTOS**

Mi profundo y sincero agradecimiento a mis asesores MSc. Ing. Erle Otto Javier Bustamante Scaglioni y PhD. Christian Edson Frias Perez por su valiosa orientación en la elaboración del estudio realizado. Por llevarme de la mano en el desarrollo de la investigación y ser mis mentores profesionales; gracias por su comprensión, sus consejos asertivos, su ánimo alentador y su calidez de persona.

Asimismo, agradezco a todas las personas que contribuyeron en la realización del estudio: a los pobladores por su cálida recepción e interés en las mediciones de los ríos amazónicos; en especial a don Juanito, por su valioso apoyo conduciendo la embarcación, por el apoyo en campo y compartiendo sus vivencias durante nuestras jornadas de medición, siempre alentándonos bajo la inclemencia del sol a continuar con nuestra labor y cumplir el objetivo.

El apoyo logístico de los colaboradores del Centro de Investigación y Tecnología del Agua, en especial al equipo de campo por acompañarme a realizar las mediciones teniendo paciencia y dedicación y a la Marina de Guerra del Perú por los datos que nos compartieron para realizar adecuadamente esta tesis.

## INDICE

	Página
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Objetivo general .....	2
1.2. Objetivos específicos.....	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA .....	3
2.1. Amazonia peruana .....	3
2.2. Reserva Nacional Pacaya Samiria .....	4
2.3. Objetivos de conservación en la RNPS. ....	7
2.4. Registro de velocidades y caudales en los ríos amazónicos .....	9
2.5. Programas y softwares de modelización hidráulica e hidrodinámica.....	9
2.6. Modelización bidimensional (2D) para inundaciones fluviales .....	11
2.6.1. Conservación del momento .....	13
2.6.2. Malla computacional 2D.....	16
2.7. Antecedentes de investigación.....	18
2.7.1. Actividad antropogénica en la RNPS .....	18
2.7.2. Ciclo reproductivo de los peces comerciales en la RNPS .....	23
2.7.3. Influencia de la dinámica fluvial en la flora .....	25
2.7.4. Influencia de la dinámica fluvial en la fauna.....	29
2.7.5. Modelamiento hidrodinámico e hidrológico .....	33
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	39
3.1. Descripción general de la zona de estudio.....	39
3.1.1. Hidrología.....	39
3.1.2. Geomorfología.....	41
3.1.3. Morfología de los ríos.....	42
3.1.4. Cobertura vegetal.....	43
3.1.5. Biodiversidad y ecosistemas.....	44

3.1.6. Zonificación.....	47
3.2. Materiales.....	49
3.2.1. Equipos .....	49
3.2.2. Software y programas .....	49
3.2.3. Insumos.....	49
3.3. Criterios de investigación .....	50
3.3.1. Nivel de investigación .....	50
3.3.2. Tipo de investigación.....	50
3.3.3. Variables de investigación.....	50
3.3.4. Operación de las variables .....	50
3.3.5. Diseño de investigación.....	52
3.3.6. Población y muestra.....	52
3.3.7. Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....	52
3.3.8. Análisis de datos .....	53
3.4. Metodología.....	53
3.4.1. Dominio computacional y características hidráulicas de los ríos .....	54
3.4.2. Condiciones de borde e iniciales de caudales.....	58
3.4.3. Calibración del modelo bidimensional .....	61
IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES .....	65
4.1. Dominio computacional y características hidráulicas de los ríos .....	65
4.2. Condiciones de borde e iniciales de caudales.....	68
4.3. Calibración del modelo bidimensional .....	71
4.3.1. Estabilidad del modelo bidimensional.....	76
4.3.2. Rutas de descargas y conectividad lateral .....	77
4.3.3. Flora y fauna en la Reserva Nacional Pacaya Samiria .....	84
V. CONCLUSIONES.....	92
VI. PROPUESTAS A FUTURO .....	93



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	94
VIII. ANEXOS .....	98

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1. Categorías de manejo de las Áreas Naturales Protegidas.....	5
2. Áreas de Uso Turístico por cuencas .....	6
3. Objetos de conservación.....	7
4. Zonificación de la Reserva Nacional Pacaya Samiria y usos permitidos.....	48
5. Variables de entrada y salida del sistema integrado .....	50
6. Métodos utilizados en la generación de los parámetros en campo.....	52
7. Estaciones hidrométricas usadas para registrar los niveles del agua para cada río .....	588
8. Iteraciones del modelo bidimensional .....	73
9. Áreas de inundación con respecto al dominio del modelo bidimensional .....	81

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Conexión entre los ecosistemas de las subcuencas principales de la cuenca Amazónica.....	3
2. Depresión de Ucamara en la Reserva Nacional Pacaya Samiria.....	5
3. Terminología de malla computacional de modelado 2D HEC-RAS.....	17
4. Ejemplo de diagrama de Delaunay-Voronoi .....	18
5. Volumen de captura de pescado fresco en el año hidrológico 2016 - 2017 .....	19
6. Ubicación de la RNPS y su zona de amortiguamiento .....	19
7. Porcentaje del consumo y comercio de la actividad pesquera en las épocas de vaciante y crecida del canal de Puinahua.....	20
8. Actividad pesquera en kg en las épocas de vaciantes y creciente del año hidrológico 2016 - 2017.....	21
9. Actividad pesquera en la RNPS durante 2014 al 2017 con la clasificación del almacenamiento de carbono .....	22
10. Periodo reproductivo de boquichico en el año hidrológico 2016 - 2017.....	23
11. Periodo reproductivo de llambina en el año hidrológico 2016 - 2017 .....	24
12. Periodo reproductivo de carachama en el año hidrológico 2016 - 2017 .....	25
13. Los bosques tropicales (< 500 msnm) y la RNP .....	26
14. Tipos de bosques de la RNPS.....	26
15. Promedio mensual de árboles en diez años de observación que iniciaron la floración.....	28
16. Comparación entre la precipitación y la producción de frutos mensual basado en el peso de frutos, semillas y cáscaras .....	28
17. Composición de la dieta del venado colorado .....	29
18. Composición de la dieta del sajino .....	30
19. Diferencias entre número de especies y biomasa de primates entre bosques de tierra firme y várzeas en el río Juruá (oeste de Amazonía brasileña) .....	31
20. Lugares de desove de cupiso, taricaya y charapa .....	32
21. Distribución mensual de nacimientos en la población de ronsocos en Cahuana.....	33

22. Simulación de la profundidad y velocidad con la mitad del registro del hidrograma de caudales para el río Ucayali.....	34
23. Análisis de inundabilidad entre el periodo de junio 2007 a enero 2009.....	34
24. Regímenes de inundación en la RNPS .....	35
25. Variación temporal del flujo de caudales .....	36
26. Cobertura durante temporada seca para el periodo 1995/1996 .....	37
27. Cobertura durante temporada húmeda para el periodo 1995/1996.....	37
28. Tendencia hidrológica del río Amazonas en la estación de Óbidos. a) se muestra la descarga mensual media, máxima y mínima anual. c) muestran el registro de sequías críticas.....	38
29. Ubicación política de la zona de estudio .....	39
30. Ubicación de las estaciones hidrometeorológicas localizadas en la RNPS. Data obtenida del SENAMHI.....	40
31. Registro histórico de épocas de creciente y vaciante de los ríos de la selva peruana .....	40
32. Precipitación promedio versus meses del rango de los años 1985 al 2015. Datos extraídos de SENAMHI .....	41
33. Caracterización geomorfológica de la RNPS. Elaborado en base a datos del INGEMMET.....	42
34. Tipos de ríos principales (A: Río trenzado “braided”. B: Río multicanal “anabranching”. C: Río meándrico) .....	43
35. Clasificación de la cobertura vegetal en la RNPS. Realizado a partir de datos del MINAM.....	44
36. Cambio de la zonificación .....	49
37. Datos de entrada para realizar la simulación del modelo bidimensional .....	50
38. Flujograma para el modelamiento bidimensional .....	54
39. Coeficientes de Manning para ríos y planicie de inundación .....	55
40. DEM en la Reserva Nacional Pacaya Samiria en el programa QGIS 3.16.16 .....	55
41. Mediciones de datos batimétricos e hidrodinámicos en campañas del 2014, 2018 y 2019	56

42. Filtraciones de datos de batimetría en HyPack.....	57
43. Estaciones meteorológicas para determinar las condiciones iniciales.....	57
44. Condiciones de borde según el modelo conceptual de la conectividad de flujos.....	59
45. Configuración de los cauces de los ríos según su geometría.....	60
46. Interpolación de caudales usando la ecuación de Manning para el río Tapiche.....	60
47. Hidrogramas de entrada para un régimen de flujo no permanente.....	61
48. Diagramas de elevación del nivel del agua .....	62
49. Exportación de caudales de salida en HEC-RAS 6.2 .....	63
50. Exportación de áreas de inundación de salida en HEC-RAS 6.2 .....	63
51. Traslape de cobertura vegetal y geomorfología con las áreas de inundación en QGIS 3.16.16.....	64
52. Dominio del modelo bidimensional de 34754.704 km <sup>2</sup> con 322782 celdas.....	65
53. Área de refinamiento total de 2158.71 m <sup>2</sup> , 400x400 la llanura de inundación, 80x80 ríos grandes y 25x25 ríos pequeños.....	66
54. Magnitud de velocidad con la distribución del flujo secundario (cm/s) en la sección transversal del río Marañón, registrada el 18/01/19 .....	66
55. Magnitud de velocidad con la distribución del flujo secundario (cm/s) en la sección transversal del río Ucayali registrada el 20/02/19 .....	67
56. Datos de nivel de agua obtenidos de estaciones del SENAMHI.....	67
57. Caudales de las estaciones San Regis para el río marañón y Requena para el río Ucayali	68
58. Condiciones de borde para el modelo bidimensional, a) Río Huallaga, b) Río Marañón, c) Río Tigres, d) confluencia con el Río Amazonas, e) Río Tapiche, f) Río Ucayali, g) Río Pacaya h) Río Samiria .....	69
59. Interpolación de caudales con la curva de calibración curva – nivel .....	70
60. Condiciones iniciales con caudales mínimos en el río Amazonas .....	70
61. Calibración de tirantes máximos del río marañón para el 15 de enero del 2019.....	71
62. Calibración de tirantes máximos del río ucayali para el 15 de enero del 2019 .....	72
63. Calibración del ciclo hidrodinámico del río marañón en el año hidrológico 2018 – 2019	72

64. Calibración del ciclo hidrodinámico del río ucayali en el año hidrológico 2018 – 2019...	73
65. Valores de los coeficientes de manning para los ríos y cochas .....	74
66. Simulación mínima hidráulica e hidrodinámica en la RNPS .....	75
67. Simulación hidráulica e hidrodinámica en su máxima avenida en la RNPS.....	75
68. Numero de courant en la simulación hidráulica e hidrodinámica para la máxima inundación .....	76
69. Error de volumen acumulado en la simulación calibrado .....	77
70. Tiempo máximo de llegada de la onda de crecida para todo el dominio del modelo .....	78
71. Tiempo máximo de llegada de la onda de crecida para todo el dominio del modelo, a) y b) conectividad por el río Samiria, c) y d) conectividad por el río Pacaya .....	79
72. Tiempo máximo de llegada de la onda de crecida para todo el dominio del modelo, a), b) y c) conectividad por el río Marañón, d) conectividad por el río Samiria .....	79
73. Tiempo máximo de llegada de la onda de crecida para todo el dominio del modelo, a) conectividad por el río Tapiche, b) y c) conectividad por el río Ucayali; y d) conectividad en la confluencia del río Marañón y Ucayali.....	80
74. Hidrogramas de caudales en diversos tramos del río Huallaga.....	82
75. Hidrogramas de caudales en diversos tramos del río Marañón.....	82
76. Hidrogramas de caudales en diversos tramos del río Ucayali.....	83
77. Caudales máximos de salida del modelo bidimensional en el río Amazonas .....	83
78. Inundación fluvial máxima con un área de 14604.59 km <sup>2</sup> acoplado al mapa de cobertura vegetal en el dominio computacional .....	84
79. Inundación fluvial máxima con un área de 14604.59 km <sup>2</sup> acoplado al mapa de geomorfología en el dominio computacional .....	85
80. Conectividad hidrodinámica hacia la RNPS por el canal de Puinahua en el mes de octubre del 2018 .....	86
81. Conectividad hidrodinámica hacia la RNPS por el canal de Puinahua en el mes de enero del 2019 .....	87
82. Conectividad hidrodinámica hacia la RNPS por el canal de Puinahua en el mes de abril del 2019 .....	87

83. Conectividad hidrodinámica hacia la RNPS por el canal de Puinahua en el mes de julio del 2019 .....	88
84. Puesto de Control PV5 - Alegre .....	99
85. Canal del Puinahua y caserío Bretaña .....	99
86. Puesto de control Samiria .....	100
87. Colocación de puntos de control para el registro de niveles, caudales y batimetría del río.....	100
88. Expositor del Congreso Nacional del Agua 2020 .....	101
89. Mediciones de la hidrodinámica de los ríos Pacaya y Samiria en el año 2020 .....	102
90. Equipo de mediciones de campo conformado por investigadores, guardaparques y pobladores de la zona de la Reserva Nacional Pacaya Samiria.....	102
91. Mediciones en campo para la obtención de parámetros hidráulicos de los ríos Huallaga, Marañón y Ucayali .....	103

## RESUMEN

La tesis comprendió la descripción del proceso de inundación fluvial en la Reserva Nacional Pacaya Samiria por parte de los ríos Marañón, Ucayali, Huallaga y los tributarios Tapiche, Tigres, Samiria y Pacaya. Se describe la influencia de este proceso sobre la biodiversidad y actividad pesquera, a través del transporte de flujo y de sedimentos, nivel y caudales de los ríos según el ciclo hidrológico.

Se desarrolló un modelo bidimensional con un dominio computacional que abarca la Reserva y su área de amortiguamiento. Como parte del modelo del terreno se usó un DEM, y para la geometría del fondo de los ríos Huallaga, Marañón, Ucayali, Pacaya y Amazonas se usaron las batimetrías realizadas por parte de la Marina de Guerra del Perú en el 2014 en el río Amazonas y para los demás ríos, por el Centro de Investigación y Tecnología del Agua (CITA) en el 2018 y 2019. Con respecto a las condiciones de borde se utilizaron los caudales interpolados de las campañas del 2018 y 2019 del proyecto MOORE del CITA-UTEC; y se calibraron con los niveles de agua de las estaciones hidrométricas del SENAMHI transformadas a elevaciones con ondulación geoidal EGM96.

Se calibraron los niveles de agua de los ríos Marañón y Ucayali en las estaciones San Regis y Requena con elevaciones del nivel del agua de 106.341 m y 101.96 m respectivamente con un valor de coeficiente de manning de 0.04 para ambos ríos. Se obtuvo un caudal máximo en el río Amazonas de 56459.2 m<sup>3</sup>/s, y se obtuvo un área de inundación máxima de 6698.92 km<sup>2</sup> que corresponde al 19% del área de la Reserva para el año hidrológico 2018-2019. Se identificaron las rutas de descarga en donde el mayor ingreso es a través del canal de Puinahua en los meses de abril y mayo, con lo que se contrastaron las áreas inundadas con los mapas de cobertura vegetal, geología, geomorfología y zonas de vida. Finalmente se describió la relación del ciclo hidrológico con la diversidad de flora y fauna.

Se demostró que la biodiversidad tiene una relación directa con el proceso de inundación de los ríos Huallaga, Marañón y Ucayali, identificándose la planicie de inundación de la Reserva, las rutas de descarga de los flujos no permanentes, las rutas de migración de la fauna, proliferación de la flora; y productividad de la actividad pesquera por medio del modelo hidrodinámico bidimensional a escala regional como parte de este estudio.

### **PALABRAS CLAVES:**

Reserva Nacional Pacaya Samiria, llanura fluvial, inundación, modelización bidimensional, biodiversidad.



## **ABSTRACT**

The thesis included the description of the flooding process in the Pacaya Samiria National Reserve by the Huallaga, Marañón and Ucayali rivers. It describes the influence of this process on biodiversity and fishing activity, through the transport of flow and sediment, river levels and flows according to the hydrological cycle.

A bidimensional model was developed with a computational domain encompassing the reserve and its buffer area. A DEM was used as part of the terrain model, and the riverbeds of the Huallaga, Marañón, Ucayali, Pacaya and Amazon rivers were generated from bathymetries measured in 2014 by the Peruvian Navy; and in 2018 and 2019 generated by the Centre for Water Research and Technology (CITA). Concerning edge conditions, interpolated flow rates from the 2018 and 2019 campaigns of the MOORE project of CITA-UTEC were used; and calibrated with data recorded by SENAMHI meteorological stations.

The water levels of the Marañón and Ucayali rivers were calibrated at the San Regis and Requena stations with water level elevations of 106.341 m and 101.96 m respectively with a manning coefficient value of 0.04 for both rivers. A maximum flow in the Amazon River of 56459.2 m<sup>3</sup>/s was obtained, and a top flood area of 6698.92 km<sup>2</sup> was obtained, corresponding to 19% of the reserve area for the hydrological years 2018-2019. The discharge flows were identified, where the most significant low is through the Puinahua channels of April and May. The flooded areas were contrasted with vegetation cover maps, geology, geomorphology and life zones. Finally, the relationship between the hydrological cycle and the diversity of flora and fauna was described.

It is concluded that biodiversity is highly related to water and sediment exchange between the rivers and floodplains of the reserve by means of the bidimensional hydrodynamic model at regional scale as part of this study.

### **KEYWORDS:**

Pacaya Samiria, river plain, flooding, two-dimensional modeling, biodiversity.

## I. INTRODUCCIÓN

La Reserva Nacional Pacaya Samiria (RNPS), se encuentra en el departamento de Loreto, tiene una superficie de 20.800 km<sup>2</sup> siendo la mayor reserva natural del Perú limitada entre los ríos Huallaga al noroeste, Ucayali al sur y Marañón al norte. La RNPS cuenta con una de las mayores actividades de pesca e índice de biodiversidad en el Perú con variaciones de intensidad según los niveles de agua de los ríos, cochas y llanura de inundación. La llanura de inundación de la RNPS se caracteriza por tener una pendiente llana, poseer una extensa red de cochas conectadas entre sí, que permanecen inundadas permanente o semipermanentemente según su ciclo hidrológico anual. Los procesos de inundación y la presencia de estructuras geomorfológicas debido a la dinámica hidrodinámica de los ríos enriquecen la biodiversidad de la Reserva por medio del transporte de flujos con sedimentos y nutrientes. Esta relación se le conoce como dinamismo fluvial que da lugar al enriquecimiento del hábitat amazónico según los ciclos de inundación, la geomorfología de los cauces y llanura de inundación; y las condiciones climáticas.

La importancia de los ríos en el ciclo hidrológico e hidrodinámico en la RNPS, requieren de una atención especial ante cualquier actividad humana. Por lo que es necesario comprender cada proceso como parte de un sistema integrado que mantiene el equilibrio entre la conservación y el bienestar de la población. Por ello, se deben conocer los impactos ambientales de proyectos de infraestructura de gran magnitud o proyectos de dragados, de la tala ilegal de madera, de la actividad pesquera y de los efectos del cambio climático de la que puedan afectar este equilibrio.

Para conocer el grado de impacto que pueden ocasionar estas actividades ajenas hacia la conservación del equilibrio de este ecosistema; en primer lugar, se debe conocer el estado actual de este mismo en un año hidrológico y como punto de partida este trabajo de tesis se desarrolló bajo la perspectiva de una línea base física ambiental que mediante la modelización bidimensional, describió la relación de la biodiversidad con el proceso de inundación en la Reserva Nacional Pacaya Samiria según la variación de los caudales y niveles de agua de los ríos.

Entonces ¿El modelo bidimensional predice el proceso de inundación fluvial en la Reserva Nacional Pacaya Samiria, periodo 2018-2019?, por lo que; el modelo bidimensional predice el proceso de inundación mediante las rutas de descarga y conectividad lateral de los

ríos Huallaga, Marañón y Ucayali hacia la Reserva Nacional Pacaya Samiria, en el periodo 2018-2019.

### **1.1. Objetivo general**

- Simular un modelo bidimensional de las inundaciones fluviales en la llanura de inundación de la Reserva Nacional Pacaya Samiria para el periodo 2018-2019.

### **1.2. Objetivos específicos**

- Determinar la geometría del dominio computacional y las características hidráulicas del modelo bidimensional.
- Determinar las condiciones de borde e iniciales de caudales en el año hidrológico 2018 - 2019.
- Realizar la calibración de la simulación del modelo bidimensional de las inundaciones fluviales.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. Amazonia peruana

El área que comprende la extensión de la cuenca del río Amazonas es de 6 millones de km<sup>2</sup>, la cual alberga una múltiple red de enlaces entre los ecosistemas terrestres y de agua dulce (figura 1). Dicha red de conexiones ecosistémicas depende de las características geomórficas y de los patrones hidrológicos de la cuenca, dando lugar a la formación de lagos, canales, humedales y depósitos aluviales que van alterando su formación en el tiempo (Alsdorf, 2003; Park y Latrubesse, 2017). La alta diversidad biológica y de vegetación son los principales factores que son alterados por los cambios en los flujos aluviales estacionales que ocurren en la llanura de inundación (Salo et al., 1986). Estos cambios se dan por la alteración de regímenes de flujo, los cuales ocasionan variaciones en los niveles de agua de los canales principales y en los cuerpos de agua, como las tipishcas o lagos de paleocauces. Estas zonas son de gran relevancia ecológica ya que sirven de protección, y brindan alimento y zonas de desove a las especies acuáticas (Virgilio et al., 2020; Couto et al., 2018; Junk, et al., 1989).

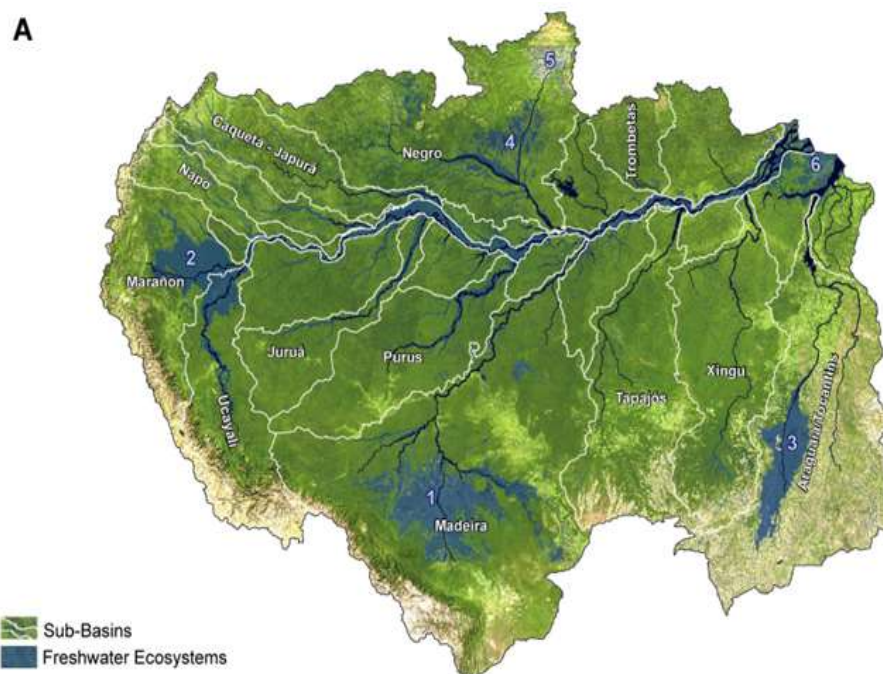


Figura 1. Conexión entre los ecosistemas de las subcuencas principales de la cuenca Amazónica

Fuente: Castello et al., 2017

La Amazonía peruana es una de las regiones que alberga mayor biodiversidad del planeta, con un récord mundial de biodiversidad por unidad de superficie (OTCA, 2009). Algunas teorías explican que su alto valor biológico depende de las correlaciones de los

ecosistemas con la variación de niveles de agua de los ríos ya que guarda relación con los patrones de inundación (Ferreira y Stohlgren, 1999), la geomorfología del cauce, los cambios climáticos altitudinales y la influencia de la parte alta en el cauce del río (Naiman et al., 1993). Puhakka y Kalliola (1993), Kalliola et al. (1993); y Kalliola et al. (1992) describieron cómo los patrones de vegetación y la diversidad de especies están controlados por factores ambientales, como (i) la dinámica del río que define el tipo de vegetación; (ii) la influencia del cambio de estación en la llanura aluvial que genera regiones de diferentes elevaciones, edad y propiedades del suelo (procesos de deposición a lo largo de las barras puntuales, crestas, depresiones, cuencas inundadas y canales abandonados); (iii) el dinamismo de las inundaciones que afectan el hábitat y la distribución de las especies vegetales; y (iv) los procesos aluviales que crean nuevos hábitats, los modifican y producen gran diversidad de vegetación. El cambio estacional de la descarga en los ríos genera variaciones en los ciclos del agua, que se asocian con la frecuencia de las inundaciones, la erosión de las riberas, cambios en la actividad pesquera, cambios en la planimetría del río y los patrones altimétricos (Salonen et al., 2012; Abad et al., 2013).

## **2.2. Reserva Nacional Pacaya Samiria**

La Reserva Nacional Pacaya Samiria (RNPS) (Figura 2) comprende un área de aproximadamente 20000 km<sup>2</sup>, es catalogada como un área de conservación de gran importancia a nivel nacional por su alto índice de biodiversidad. Desde el año 1992, la RNPS es consignada como sitio RAMSAR (Humedal de importancia Internacional por ser hábitat de aves acuáticas). La reserva es una zona rica en especies ictiológicas, dando lugar a la alta productividad pesquera que es aprovechada por las comunidades que habitan aledañas a la reserva. La RNPS es administrada por el Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado (SERNANP), se encuentra dentro de la categoría de áreas de uso directo, teniendo como objetivo principal el uso sostenible de los ecosistemas naturales (tabla 1).

Tabla 1. Categorías de manejo de las Áreas Naturales Protegidas

Áreas de Uso Indirecto (Protección estricta / no utilización directa)	Parque Nacional Santuario Nacional Santuario Histórico
Áreas de Uso Directo (Uso sostenible de ecosistemas naturales)	Reserva Nacional Bosques de Protección Reservas comunales Reservas Paisajísticas Refugio de Vida Silvestre Cotos de Caza

Fuente: Plan Maestro 2009-2013 RN Pacaya - Samiria (Ley de ANP, 1997)

La RNPS como se muestra en la figura 2, está delimitado por diversas cuencas y subcuencas que comprende a los ríos Pacaya, Samiria, Huallaga, Marañón y Ucayali, cuyo comportamiento depende de la variación de regímenes de precipitación de la Cordillera Oriental del Perú (Goulding et al., 2003), forman la Depresión Ucamara perteneciendo en gran parte, a la llanura de inundación de la Reserva. La llanura de inundación abarca un área de 662781.56 ha, lo cual corresponde el 30.43% de la superficie de la RNPS (*Resolución de Presidencia N° RP 273-2017-SERNANP*).

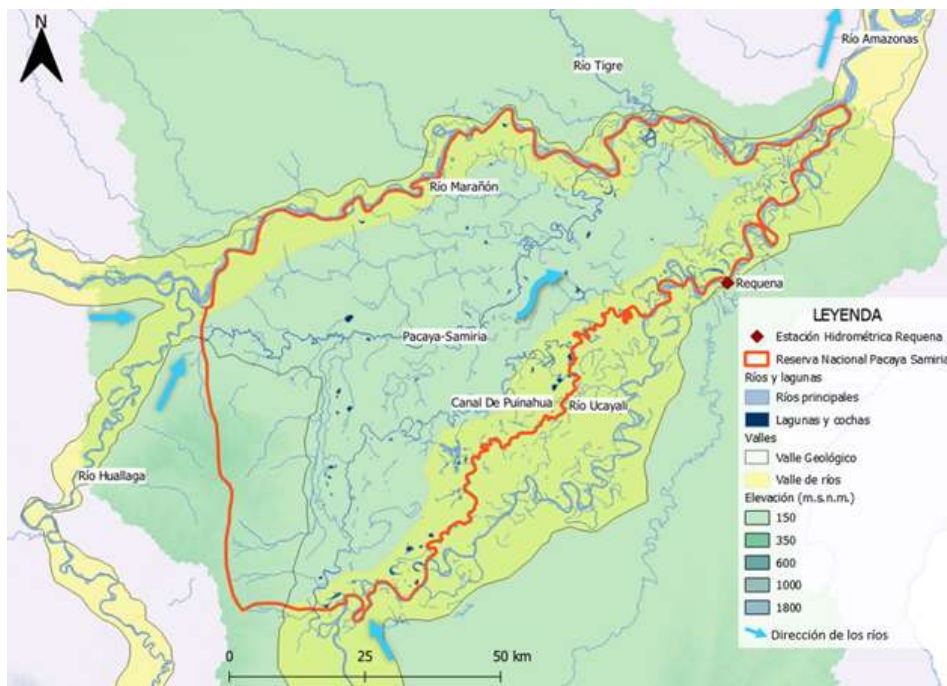


Figura 2. Depresión de Ucamara en la Reserva Nacional Pacaya Samiria

Según lo establecido por la Ley de Áreas Naturales Protegidas, Plan Director (aprobado mediante Decreto Supremo N° 016-2009-MINAM), y Plan Maestro de la RNPS (aprobado mediante Resolución Presidencia N°173-2009-SERNANP), “la actividad turística y recreativa se puede desarrollar dentro de las zonas de: 1) Recuperación, 2) Silvestre, 3) Aprovechamiento Directo y 4) Uso Especial”. Dentro de la reserva, se han destinado áreas específicas para el desarrollo de las actividades turísticas como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Áreas de Uso Turístico por cuencas

<b>Cuenca</b>	<b>Área de Uso Turístico</b>
Yanayacu	Pahuachiro Poza Cocha Nauta Caño Cocha San Jacinto Yanayacu Pucate - Cocha Dorado
Samiria	Bajo y Medio Samiria Tibilo Pastococha
Pacaya	Yanallpa - Iricahua Bajo Pacaya Cocha de Punga

Fuente: Resolución de Presidencia N° RP 273-2017-SERNANP

En épocas de precipitaciones, los ríos tienen crecidas en sus cauces y van adicionando material sedimentario rico en nutrientes, los cuales son trasladados y depositados en la llanura de inundación. Otro de los factores claves en la dinámica de la RNPS es la geomorfología del área, donde podemos encontrar formaciones como cochas, islas, y cortes de meandros, que dan lugar a la interconexión entre los ríos Pacaya y Samiria (Dumont y García, 1991; Kvist y Nebel, 2001). Otro referente con respecto a las implicancias que tiene la variación del régimen de inundación es la productividad de la vegetación y la bioacumulación de metales pesados, así mismo su relación con la disponibilidad de nutrientes y su efecto en el ciclo de carbono (Wilson et al., 2007).

Cabe mencionar que el análisis de inundaciones utilizando metodologías de teledetección no son viables en el área de la RNPS debido a las condiciones de la vegetación

arbórea, que por su alta densidad cubren el área de estudio. (Jensen et al., 2018, Rodríguez-Alvarez et al., 2019).

La carga sedimentaria transportada por el flujo de los ríos corresponde a tres tipos; sólidos disueltos, sólidos o sedimentos suspendidos y sedimentos de fondo, cuya suma de todos ellos es denominado sólidos totales. Los sedimentos suspendidos son de particular importancia porque son partículas de un tamaño mayor a 0.45um, presentes en la columna de agua y en constante movimiento con el flujo y la turbulencia del movimiento, lo cual impide su deposición en el fondo. Los sedimentos son material no consolidado provenientes de la meteorización química, física y biológica del suelo y rocas (Dominguez et al., 2013).

### 2.3. Objetivos de conservación en la RNPS.

En el Plan Maestro 2009-2013 RN Pacaya - Samiria se indica cuáles son los objetos de interés de conservación para la RNPS, identificados en los sistemas de monitoreo biológico. Para dicha caracterización se tomó en consideración la opinión de los actores locales y los estudios biológicos de la zona. La tabla 3 muestra los sistemas naturales, las especies claves y el objeto de conservación priorizado.

Tabla 3. Objetos de conservación

Objetivos de Conservación de la RNPS				
Sistemas Naturales	Superficie		Especies Claves en el Sistema Natural	Objetos de Conservación
	Ha	%		
Bosques inundables o Llanuras de inundación	662781.56	30.43	Coto Mono ( <i>Alouatta seniculus</i> ), Mono Choro ( <i>Lagothrix lagotricha</i> ), Majas ( <i>Agouti paca</i> ), Cedro ( <i>Cedrela odorata</i> ), Caoba ( <i>Swietenia microphylla</i> ), Manati ( <i>Trichechus inunguis</i> ), Bufe Colorado ( <i>Inia geoffrensis</i> ), Bufe Gris ( <i>Sotalia fluviatilis</i> ), Tuyuyo ( <i>Jabiru mycteria</i> ), Lobo de rio ( <i>Pteronura brasiliensis</i> ), Aves acuáticas, Aguaje ( <i>Mauritia flexuosa</i> L.f.), Huasaí ( <i>Euterpe precariota</i> ), Lupuna ( <i>Ceiba petandra</i> ), Sacha Vaca ( <i>Tapirus</i>	Lobo de rio ( <i>Pteronura brasiliensis</i> ) y Tuyuyo ( <i>Jabiru mycteria</i> )



			<i>terrestres</i> ), Sajino ( <i>Tayassu tajacu</i> ), Huangana ( <i>Tayassu pecari</i> ), Ronsoco ( <i>Hydrochoerus hydrochaeris</i> ), Gamitana ( <i>Colossoma macropomun</i> ) y Paiche ( <i>Arapaima gigas</i> )	
Bosques de colina	215470.63	9.89	Capirona ( <i>Calycophyllum spruceanum</i> ), Tamamuri ( <i>Pseudolmedia laevigata</i> ), Cedro ( <i>Cedrela odorata</i> ), Caoba ( <i>Swietenia microphylla</i> ) y Tornillo ( <i>Cedrelinga catanaeformis</i> )	Caoba ( <i>Swietenia microphylla</i> )
Restingas o Bosques de Terrazas	49131.27	2.26	Yarina ( <i>Phytelephas macrocarpa</i> ), Cedro ( <i>Cedrela odorata</i> ), Caoba ( <i>Swietenia microphylla</i> ), Lupuna ( <i>Ceiba pentandra</i> ), Majas ( <i>Agouti paca</i> ), Venado colorado ( <i>Mazama americana</i> ), Maquisapa ( <i>Atheles paniscus</i> ), Paujil ( <i>Mitu tuberosa</i> ), Pava del Monte ( <i>Pipile cumanenses</i> ), Pucacunga ( <i>Penelope jacquacu</i> ), Sachavaca ( <i>Tapirus terrestres</i> ), Sajino ( <i>Tayassu tajacu</i> ), Huangana ( <i>Tayassu pecari</i> ), Coto Mono ( <i>Alouatta seniculus</i> ) y Mono Choro ( <i>Lagothrix lagotricha</i> )	Maquisapa Ceniza ( <i>Ateles belzebut</i> ) y Huangana ( <i>Tayassu pecari</i> )
Aguajales	732386.19	33.63	Aguaje ( <i>Mauritia flexuosa</i> L. f.), Yarina ( <i>Phytelephas macrocarpa</i> ), y otras palmeras. Huangana ( <i>Tayassu pecari</i> ), Maquisapa ( <i>Atheles paniscus</i> ), Guacamayo rojo ( <i>Ara macao</i> ), Guacamayo verde y rojo ( <i>Ara chloroptera</i> ) y Huasai ( <i>Euterpe predatoria</i> )	Aguaje ( <i>Mauritia flexuosa</i> )
Playas	310761.32	14.27	Tuyuyo ( <i>Jabiru mycteria</i> ), Taricaya ( <i>Podocnemis unifilis</i> ), Charapa ( <i>Podocnemis expanda</i> ), Lagarto Negro ( <i>Melanosuchus niger</i> ), Lagarto Blanco ( <i>Caiman crocodylus</i> ) y Manshaco ( <i>Mycteria americana</i> )	Charapa ( <i>Podocnemis expanda</i> )
Cochas	23682.85	1.09	Paiche ( <i>Arapaima gigas</i> ), Lagarto Negro ( <i>Melanosuchus niger</i> ), Lobo de Río ( <i>Pteronura brasiliensis</i> ), Manatí ( <i>Trichechus inunguis</i> ), Arahua	Paiche ( <i>Arapaima gigas</i> )

			( <i>Osteoglossum bicirrhosum</i> ), Gamitana ( <i>Colossoma macropomum</i> ), Taricaya ( <i>Podocnemis unifilis</i> ), Charapa ( <i>Podocnemis expanda</i> ), Lagarto Blanco ( <i>Caiman crocodylus</i> ), Bufe Colorado ( <i>Inia geoffrensis</i> ) y Bufe Gris ( <i>Sotalia fluviatilis</i> )	
Ríos y afluentes	37725.78	1.73	Paiche ( <i>Arapaima gigas</i> ), Arahuana ( <i>Osteoglossum bicirrhosum</i> ), Gamitana ( <i>Colossoma macropomun</i> ), Taricaya ( <i>Podocnemis unifilis</i> ), Lagarto Blanco ( <i>Caiman crocodylus</i> ), Lagarto Negro ( <i>Melanosuchus niger</i> ), Lobo de Río ( <i>Pteronura brasiliensis</i> ), Manati ( <i>Trichechus inunguis</i> ), Bufe Colorado ( <i>Inia geoffrensis</i> ), Bufe Gris ( <i>Sotalia fluviatilis</i> ), Lagarto negro ( <i>Melanosuchus niger</i> ), Manatí ( <i>Trichechus inunguis</i> ) y Charapa ( <i>Podocnemis expanda</i> )	Lagarto negro ( <i>Melanosuchus niger</i> ) y Manatí ( <i>Trichechus inunguis</i> )

Fuente: Plan Maestro 2009-2013 RN Pacaya - Samiria

#### 2.4. Registro de velocidades y caudales en los ríos amazónicos

Los ríos amazónicos tienen las características de ser caudalosos en todo el año, por lo que el estudio del flujo en forma tridimensional es relevante para estudiar los procesos de sedimentación y erosión. En las “Ríos danzantes Guías metodológicas para el desarrollo de línea base física de los ríos en Andes-Amazonía” del CITA-UTEC (2021), recomiendan utilizar las metodologías por equipos hidroacústicos como un Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) y ecosondas monohaz o multihaz con diferentes frecuencias para realizar las mediciones de batimetría, registros de caudales y velocidades.

#### 2.5. Programas y softwares de modelización hidráulica e hidrodinámica

Los modelos hidráulicos son utilizados para simplificar y relacionar los efectos de las estructuras hidráulicas como puentes, presas, o balsas con la dinámica de los flujos permanentes o no permanentes, además del transporte de sedimentos e infiltraciones de agua en materiales granulares. La modelización hidráulica del flujo permite su uso en diferentes aplicaciones prácticas tanto en régimen libre como a presión.

Su principal aplicación consiste en conocer los valores que toman las variables hidráulicas como el calado, velocidad y número de Froude, entre otras; a partir de la geometría de los cauces y de las temporadas de crecientes o avenidas de un período de retorno determinado, resuelta por métodos numéricos de ecuaciones analizadas para una zona de estudio.

El software libre HEC-RAS resuelve las ecuaciones de Saint Venant y Onda Difusa en 1D y 2D. Teniendo las siguientes características (HEC-RAS 6.2 - Flujo 2D):

- Usa el método de Volúmenes Finitos Implícitos.
- Resuelve el acoplamiento de modelos 1D y 2D.
- Desarrolla mallas estructuradas y no estructuradas.
- Modelización más precisa de los cauces rectos y meándricos.
- Modelización más precisa de las avenidas en las llanuras de inundación.
- Tiene una extensión llamada “RasMapper” con la cual se puede obtener Mapas de Avenidas y animación de inundaciones.
- Brecha de presa y dique
- Falla de presa de relaves y predicción de volumen

El software con licencia FLO-2D es un modelo que simula inundaciones de ríos, abanicos aluviales, urbanos y costeros. Puede abordar cualquier problema de inundaciones, incluyendo (EN LINEA: FLO-2D Pro, 26 ene 2022):

- Inundación en la zona urbana y desborde de los ríos
- Lluvias y escorrentías de cuencas
- Modelado de drenaje pluvial
- Flujos de lodo y escombros
- Interacción entre aguas superficiales y subterráneas
- Brecha de presa y dique
- Falla de presa de relaves y predicción de volumen
- Estudios de seguros contra inundaciones

El software libre IBER es un modelo hidrodinámico bidimensional para simulaciones en lámina libre realizando el cálculo hidráulico, por medio de los modelos de turbulencia, transporte de sedimentos, calidad de aguas, análisis de riesgo de inundación, rotura de embalses

y procesos hidrológicos. Algunos de los campos de actuación de la actual versión de IBER son (EN LÍNEA: IBER, 26 ene 2022):

- Simulación del flujo en lámina libre en cauces naturales.
- Evaluación de zonas inundables.
- Cálculo de rotura de presa.
- Cálculo hidráulico de encauzamientos.
- Estabilidad de los sedimentos del lecho del río.
- Cálculo hidráulico de redes de canales en lámina libre.

## 2.6. Modelización bidimensional (2D) para inundaciones fluviales

Los modelos hidráulicos en 2D son aplicadas para inundaciones en zonas de interés, como el análisis de riesgo para gestionar y prevenir grandes pérdidas en zonas pobladas y/o estudiar el impacto de diversos proyectos hidráulicos aguas arriba de la zona de interés. El programa HEC-RAS es un programa que desarrolla cálculos, en 1D y 2D, para cauces naturales y artificiales, llanuras de inundación, estructuras hidráulicas, calidad del agua, transporte de sedimentos, entre otras (US Army Corps of Engineers, 2022).

Para el desarrollo de la modelización de canales e inundaciones, se utilizan ecuaciones simplificadas de las ecuaciones de Navier-Stokes describen el movimiento de los fluidos en tres dimensiones. Una de estas son las ecuaciones de aguas poco profundas (SWE) en donde la escala de longitud vertical es mucho menor que las escalas de longitud horizontal. Por lo que la velocidad vertical es menor y la presión es hidrostática (US Army Corps of Engineers, 2022).

El modelo de SWE resuelve las ecuaciones de conservación del volumen y del momento incluyendo las aceleraciones temporales y espaciales, así como la mezcla horizontal, mientras que el modelo de onda difusiva (DWE) ignora estos procesos, siendo más sencillo y requiriendo menor capacidad de cómputo. La conservación del volumen en 2D de la mezcla agua-sólido viene dada por (Ecuación 1):

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \cdot (hV) = q \quad (1)$$

Dónde:

- $\eta$  es la elevación de la superficie del flujo
- $t$  es el tiempo
- $h$  es la profundidad del agua

- $V$  es el vector de velocidad
- $q$  es un término de fuente o sumidero, para dar cuenta de los flujos externos e internos.

Las ecuaciones de conservación del momento promediadas en profundidad se muestran en la ecuación 2 (Hergarten y Robl, 2015):

$$\frac{\partial V}{\partial t} + (V \cdot \nabla)V = -g \cos^2 \varphi \nabla \eta + \frac{1}{h} \nabla \cdot (v_t h \nabla V) - \frac{\tau}{\rho_m R \cos \varphi} \frac{V}{|V|} \quad (2)$$

Dónde:

- $g$  es la aceleración gravitacional
- $v_t$  es la viscosidad turbulenta de los remolinos
- $\tau$  es la tensión basal total
- $\rho_m$  es la densidad de la mezcla agua-sólido
- $R$  es el radio hidráulico
- $V$  es la magnitud del vector de velocidad
- $\varphi$  es la pendiente de la superficie del agua
- $\psi$  es el ángulo de inclinación de la dirección de la velocidad de la corriente.

El segundo término del lado derecho representa la mezcla horizontal debida a la turbulencia. Los términos de mezcla son esenciales para la conservación precisa del momento. El coeficiente de fricción del fondo se calcula utilizando el coeficiente de rugosidad de Manning como (Ecuación 3):

$$\tau = \tau_b + \tau_{MD} \quad (3)$$

Donde:

- $\tau_b$  es el esfuerzo cortante de fondo turbulento
- $\tau_{MD}$  es el esfuerzo de lodo y escombros que incluye todos los esfuerzos no newtonianos.

El esfuerzo cortante de fondo turbulento se calcula en función del coeficiente de rugosidad de Manning (Ecuación 4).

$$\tau_b = \rho_m C_d |V|^2 \quad (4)$$

Donde:

- $\rho_m$  es la densidad de la mezcla agua-partícula
- $C_d$  es el coeficiente de arrastre

El  $C_d$  es calculado mediante el coeficiente de rugosidad de Manning como (Ecuación 5):

$$C_d = \frac{gn^2}{R^{1/3}} \quad (5)$$

Donde:

- $n$  = coeficiente de rugosidad de Manning
- $R$  = radio hidráulico [m]
- $g$  = aceleración gravitacional [m/s<sup>2</sup>]

El coeficiente de arrastre  $C_d$  está relacionado con el coeficiente de fricción no lineal  $C_f$ , mediante (Ecuación 6):

$$C_f = \frac{C_d}{R} |V| = \frac{gn^2}{R^{4/3}} |V| \quad (6)$$

La velocidad de corte viene dada por (Ecuación 7):

$$u_* = \sqrt{\tau_b / \rho_m} \quad (7)$$

La tensión del lodo y los residuos se describe detalladamente en la sección "Modelos reológicos". Cuando la tensión no newtoniana es igual a cero y se eliminan las funciones coseno (correcciones de pendiente), las ecuaciones 2D de SWE anteriores se reducen a las ecuaciones de agua clara utilizadas en HEC-RAS (US Army Corps of Engineers, 2022).

### 2.6.1. Conservación del momento

Si las escalas de longitud horizontal son mucho mayores que la escala de longitud vertical, para la conservación del volumen implicaría una velocidad vertical pequeña. La ecuación de momento vertical de Navier-Stokes en ausencia de gradientes de presión baroclínicos, de un forzamiento del viento y de una presión no hidrostática puede utilizarse para justificar que la presión es casi hidrostática. Los términos de velocidad y derivada vertical se despreciarían para las ecuaciones de masa y de momento. Se obtienen las ecuaciones 8 y 9 de aguas poco profundas (US Army Corps of Engineers, 2022):

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - f_c v = -g \frac{\partial z_s}{\partial x} + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left( v_{t,xx} h \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left( v_{t,yy} h \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{b,x}}{\rho R} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho h} \quad (8)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + f_c v = -g \frac{\partial z_s}{\partial x} + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left( v_{t,xx} h \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left( v_{t,yy} h \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{b,y}}{\rho R} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho h} \quad (9)$$

Donde:

- u y v = velocidades en las direcciones cartesianas
- g = aceleración de la gravedad
- $z_s$  = elevación de la superficie de agua
- $v_{t,xx}$  y  $v_{t,yy}$  = coeficiente de viscosidad horizontal en las direcciones x e y.
- $\tau_{b,x}$  y  $\tau_{b,y}$  = esfuerzos cortantes del fondo en las direcciones x e y.
- R = radio hidráulico
- $\tau_{s,x}$  y  $\tau_{s,y}$  = son los esfuerzos de viento en las direcciones x e y.
- h es el tirante del agua.
- $f_c$  es el parámetro de Coriolis

En la parte izquierda de la igualdad se presentan los términos de aceleración y en la parte derecha se presentan las fuerzas internas o externas que actúan sobre el fluido. Estos términos suelen organizarse de forma que se ajusten a la segunda ley de Newton, con la cual se derivan de las ecuaciones de momento. Las ecuaciones del momento también pueden escribirse en notación vectorial y su ventaja es que resulta más compacta y fácil de procesar. La forma vectorial de la ecuación del momento es (Ecuación 10):

$$\frac{\partial V}{\partial t} + (V \cdot \nabla)V + f_c kxV = -g \nabla z_s + \frac{1}{h} \nabla \cdot (v_t h \nabla V) - \frac{\tau_b}{\rho R} + \frac{\tau_s}{\rho h} \quad (10)$$

Donde:

- $V = (u, v)^T$  es el vector de velocidad
- $v$  es el tensor de viscosidad de remolino
- $\nabla$  es el operador de gradiente
- k es el vector unitario en la dirección vertical
- $\tau_s$  es el vector de tensión superficial del viento.

Se aprecia que el término del efecto Coriolis no es estrictamente la correcta debido a la longitud inconsistente de los vectores, pero se utiliza esta notación para abreviarla y simplificarla. Los términos de izquierda a derecha son de la aceleración inestable, la aceleración convectiva, el término de Coriolis, el término de presión barotrópica, la difusión del momento, la fricción del fondo y el forzamiento del viento (US Army Corps of Engineers, 2022).

Cuando la profundidad del agua es muy pequeña, el término de fricción del fondo domina la ecuación. Por lo que, para celdas secas se toma la forma  $V = 0$ . Obteniéndose un resultado continuo y físicamente consistente durante el proceso de mojado o secado. Dado que la conservación del momento es invariante direccionalmente puede estar en cualquier dirección. En HEC-RAS, el momento se calcula normal a cada cara (Ecuación 11).

$$\frac{\partial u_N}{\partial t} + (V \cdot \nabla)u_N - f_c u_T = -g \frac{\partial z_s}{\partial N} + \frac{1}{h} \nabla \cdot (v_t h \nabla u_N) - \frac{\tau_{b,N}}{\rho R} + \frac{\tau_{s,N}}{\rho h} \quad (11)$$

Los términos de aceleración eulerianos de la izquierda pueden condensarse en un término de aceleración derivado lagrangiano tomado a lo largo de la trayectoria que se mueve con el término de velocidad (Ecuación 12):

$$\frac{DV}{Dt} = \frac{\partial V}{\partial t} + (V \cdot \nabla)V \quad (12)$$

El uso de la derivada lagrangiana tiene mayor peso cuando su discretización reduce las restricciones del número de Courant y produce un método de solución más robusto. HEC-RAS incluye un modelo hidrodinámico simplificado, con flujo no permanente, que sustituye el momento por la ecuación de onda difusiva (DWE) como se muestra en la ecuación 13:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \nabla \cdot (\beta \nabla \eta) + q \quad (13)$$

Donde  $\beta$  es un coeficiente de difusión no lineal en función de la fricción del fondo y de la tensión no newtoniana (Ecuación 14).

$$\beta = \cos^{1/2} \psi \cos \varphi \frac{K}{A} \frac{h}{|\Delta \eta|^{1/2}} \quad (14)$$

La relación del transporte y área vertical se muestra en la ecuación 15:

$$\frac{K}{A} = \left[ \frac{n^2}{(R \cos \varphi)^{4/3}} + \frac{\tau_{MD}}{\gamma_m R \cos \varphi |V|^2} \right]^{-1/2} \quad (15)$$

Donde:

- K es el transporte
- A es el área vertical.



La ecuación de difusión se ha modificado para pendientes pronunciadas siguiendo un enfoque similar al de Hergarten y Robl (2015). Por último, cuando la tensión no newtoniana es igual a cero y se eliminan las funciones coseno (correcciones de pendiente), la ecuación DWE se reduce a las ecuaciones de aguas claras utilizadas en HEC-RAS (US Army Corps of Engineers, 2022).

### **2.6.2. Malla computacional 2D**

La capacidad de modelado 2D de HEC-RAS utiliza un esquema de solución de volumen finito desarrollado para el uso de una malla computacional estructurada y no estructurada. La malla computacional puede ser una mezcla de celdas computacionales de 3 a 8 lados. Generalmente se seleccionan una resolución de cuadrícula nominal para usar; por ejemplo, celdas computacionales de 100 m x 100 m y HEC-RAS construirán la malla computacional. Una vez construida la malla inicial, se pueden realizar refinamientos de las cuadrículas con líneas de ruptura, regiones de refinamiento y las herramientas de edición de malla. HEC-RAS tiene una extensión llamada RasMapper donde facilita el proceso de creación de la malla computacional junto con los datos del terreno como DEM, DTM o DSM e imágenes aéreas como imágenes del terreno y de fondo que ayudarán a determinar dónde dibujar los límites del área de flujo 2D.

El área de flujo 2D define el límite donde se realizarán los cálculos 2D. Cada celda dentro de la malla computacional tiene las siguientes tres propiedades (Figura 3).

- Celda central donde se calcula la elevación de la superficie del agua para la celda. El centro de la celda no se corresponde necesariamente con el centroide exacto de la celda.
- Caras de la celda donde generalmente son líneas rectas, pero también pueden ser líneas multipunto.
- Puntos de la cara de la celda (FP) son los extremos de las caras de la celda, en donde para el límite exterior del área de flujo 2D se utilizan para conectar el área de flujo 2D a 1D y condiciones de contorno.

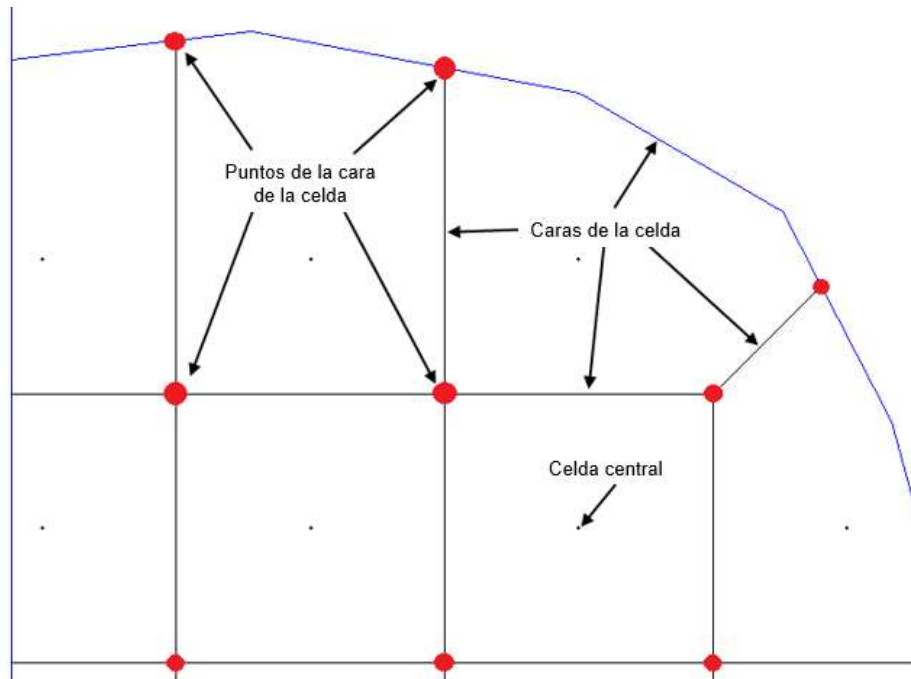


Figura 3. Terminología de malla computacional de modelado 2D HEC-RAS

Fuente: US Army Corps of Engineers, 2022

La malla computacional controlará el movimiento del agua a través del área de flujo 2D. En HEC-RAS, el terreno subyacente y la malla computacional se procesan previamente para desarrollar relaciones detalladas de elevación-volumen para cada celda y curvas detalladas de propiedades hidráulicas para cada cara de la celda; por ejemplo, la elevación frente al perímetro mojado, área y rugosidad. Al crear tablas de parámetros hidráulicos a partir del terreno subyacente, el efecto neto es que los detalles del terreno subyacente aún se consideran en el almacenamiento y transporte de agua, independientemente del tamaño de la celda computacional. Sin embargo, todavía hay límites en cuanto al tamaño de celda que se debe usar, y consideraciones importantes sobre dónde se necesitan celdas más pequeñas o celdas más grandes y gruesas.

El tamaño de la celda debe basarse en la pendiente de la superficie del agua, así como en las barreras al flujo dentro del terreno. Cuando la pendiente de la superficie del agua es plana y no cambia rápidamente, es recomendable el uso de celda más grandes y cuando las pendientes son más pronunciadas con cambios bruscos, requerirán celdas más pequeñas para capturar esos cambios. Dado que el movimiento del flujo está controlado por las caras de las celdas computacionales, se requieran celdas más pequeñas para definir cambios significativos en la geometría y cambios rápidos en la dinámica del flujo.

HEC-RAS hace la malla computacional siguiendo la técnica de Triangulación de Delaunay y luego construyendo un diagrama de Voronoi (Figura 4):

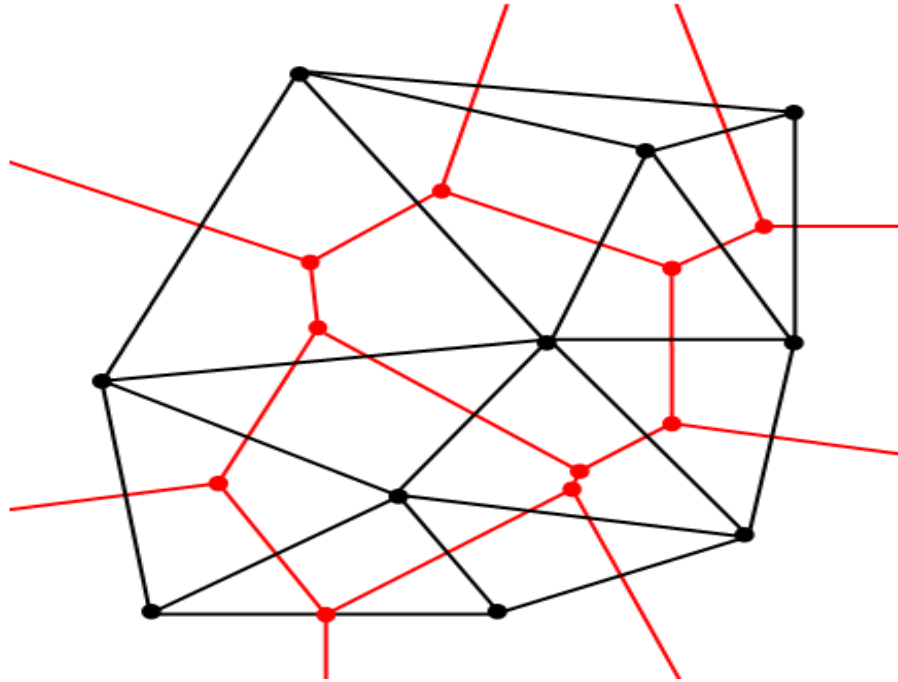


Figura 4. Ejemplo de diagrama de Delaunay-Voronoi

Fuente: US Army Corps of Engineers, 2022

Los triángulos (negros) están hechos usando la técnica de triangulación de Delaunay. Luego, las celdas (rojas) se forman dividiendo en dos todos los bordes del triángulo (bordes negros) y luego conectando la intersección de las líneas rojas (diagrama de Voronoi) siendo análogo al método del polígono de Thiessen.

## 2.7. Antecedentes de investigación

### 2.7.1. Actividad antropogénica en la RNPS

Con respecto a la actividad pesquera, las embarcaciones utilizadas son las canoas impulsadas a remo y los botes con motor conocidos como peque peque. El pescado representa un 80% del consumo total de las poblaciones, el 20% restante es compuesta por pollo, res y diversos productos enlatados como se muestra en la figura 5 (Wild Conservation Society, 2017).

Los pescados “boquichico”, “acarahuzú”, “carachama” y “tucunaré” son los de mayor preferencia para la alimentación. La “cahuara” no es del agrado para el consumo de muchas personas, debido a su aspecto grasoso, sin embargo, es uno de los más capturados y comercializados de la cuenca (Wild Conservation Society, 2017).



Figura 5. Volumen de captura de pescado fresco en el año hidrológico 2016 - 2017

Fuente: Wild Conservation Society, 2017

El 71% (58384.30 kg) del pescado es extraído de la Reserva Nacional Pacaya Samiria y el 29% (23796.20 kg) es extraído de la zona de amortiguamiento (figura 6).

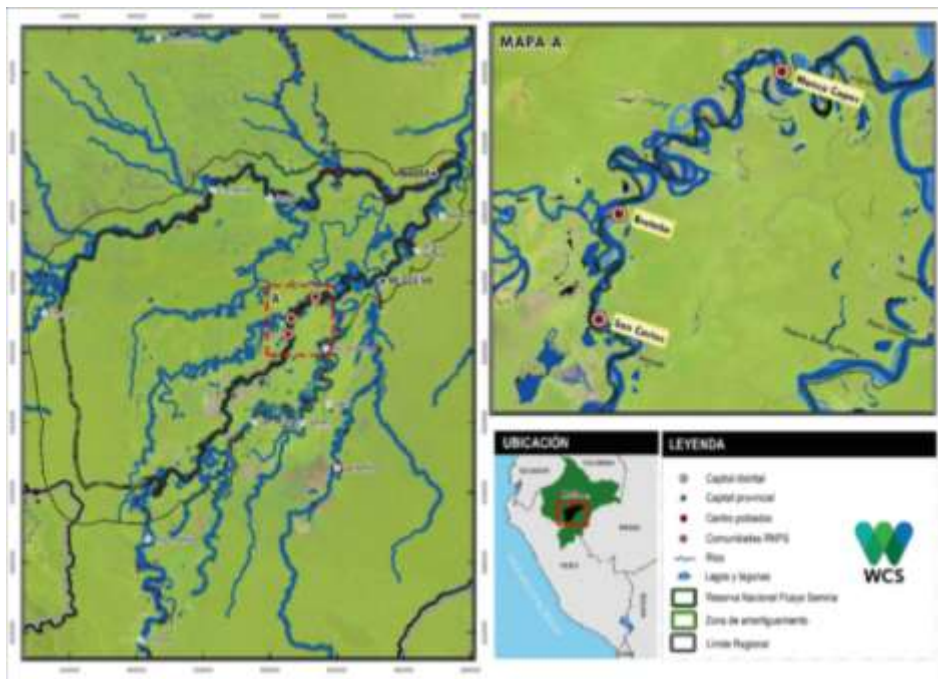


Figura 6. Ubicación de la RNPS y su zona de amortiguamiento

Fuente: Solano et al., 2020

Las zonas de amortiguamiento son espacios para dar seguridad y generar una transición entre un área que se gestiona para conservarla, con los espacios que están fuera de ella y que podrían tener distintas modalidades e intensidades de uso. La Ley de áreas naturales protegidas define a las zonas de amortiguamiento como «aquellas zonas adyacentes a las áreas naturales protegidas del sistema, que por su naturaleza y ubicación requieren un tratamiento especial para garantizar la conservación del área protegida. El plan maestro de cada área definirá la extensión que corresponda a su zona de amortiguamiento. Las actividades que se realicen en las zonas de amortiguamiento no deben poner en riesgo el cumplimiento de los fines del área natural protegida» (Solano et al., 2020).

Las capturas de pescado en la cuenca del Pacaya son destinadas principalmente para la comercialización. Una mínima parte es destinada para el consumo. De los 82180.50 kg registrados, 76636.50 kg fueron destinados para la venta y 5544 kg fueron destinados para el consumo humano.

En la figura 7 se muestra que entre marzo y mayo de 2017 se presenta un mayor porcentaje de consumo de la población (14%) mientras que entre junio y julio de 2017 se presenta un mayor porcentaje de venta (97%).

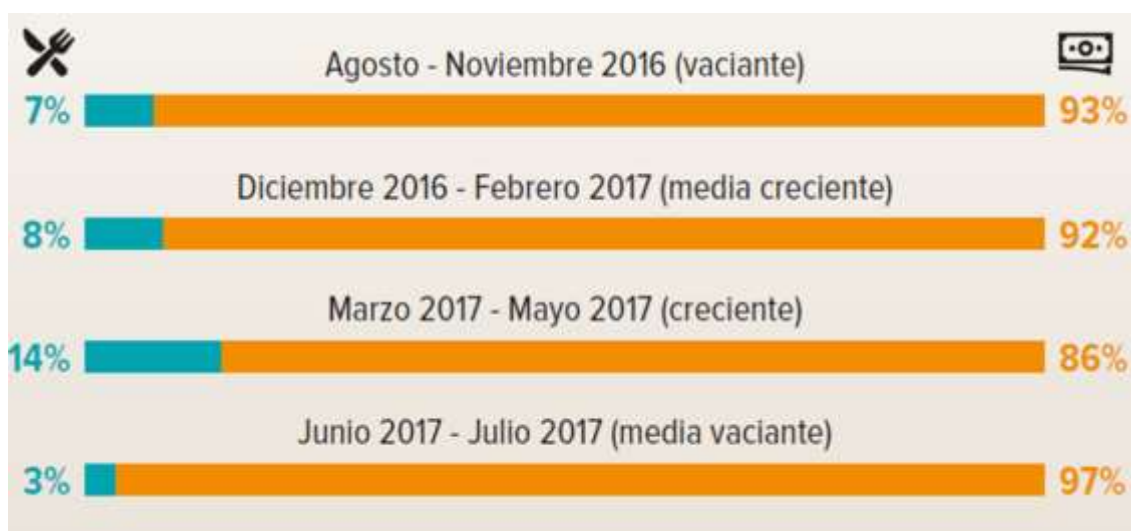


Figura 7. Porcentaje del consumo y comercio de la actividad pesquera en las épocas de vaciante y crecida del canal de Puinahua

Fuente: Wild Conservation Society, 2017

La variedad de peces extraídos principalmente es: la carachama (21371 kg), boquichico (18473.20 kg), cahuara (9344.80 kg), Paiche (5773.20 kg) y el zúngaro mota (5459 kg), cabe recalcar que en la cuenca del Pacaya la extracción de paiche por los grupos organizados se da bajo Programas de Manejo aprobados por la DIREPRO-L (Wild Conservation Society, 2017).

En el boletín de WCS (figura 8) explican que la variedad y composición de las capturas de peces varía de acuerdo con los cambios del nivel del agua: Vaciante (mínimos niveles), media creciente, creciente (máximos niveles) y media vaciante.

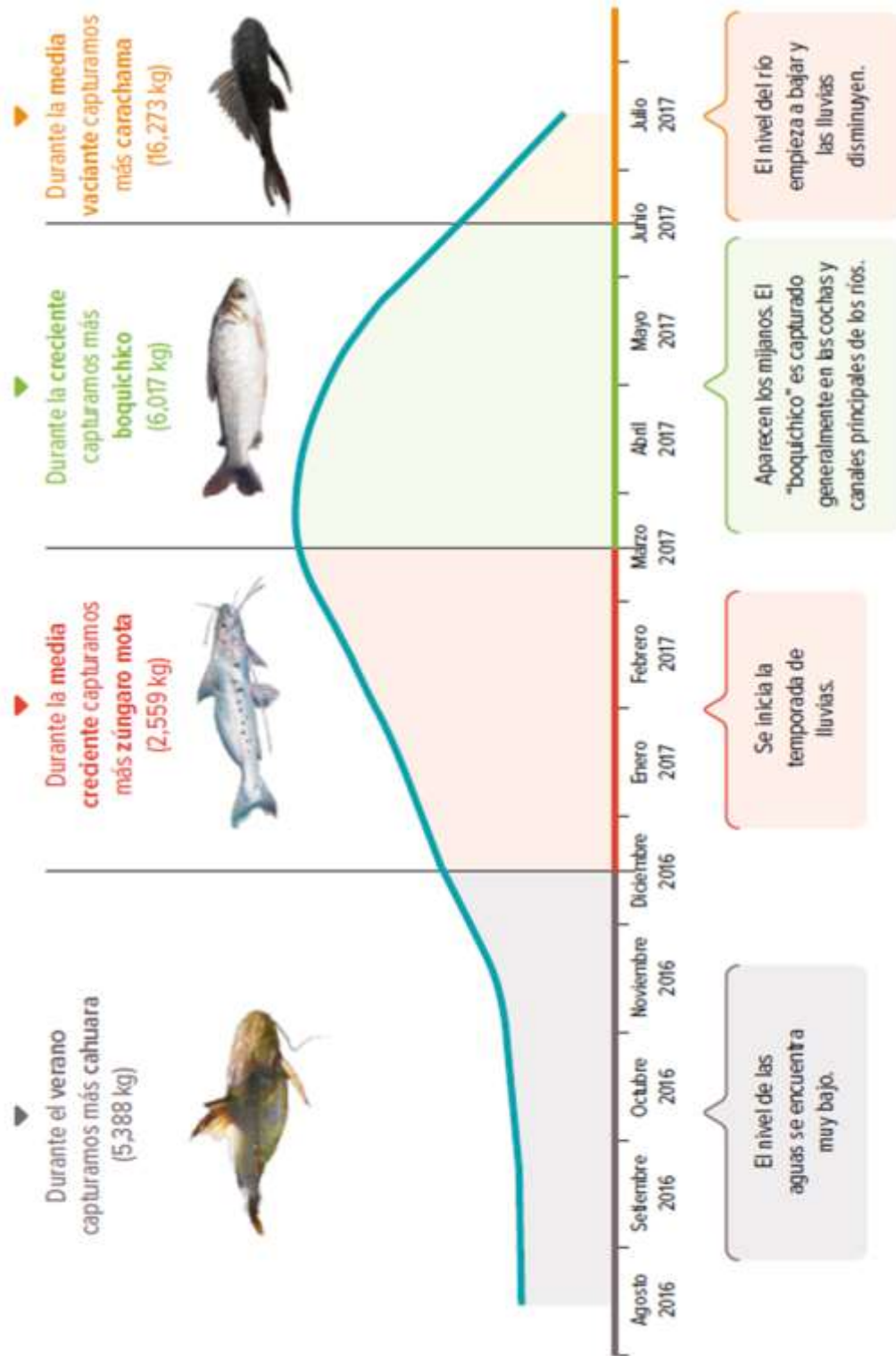


Figura 8. Actividad pesquera en kg en las épocas de vaciante y creciente del año hidrológico 2016 - 2017

Fuente: Wild Conservation Society, 2017

Con respecto a la extracción de especies forestales, en el Plan Maestro del periodo 2009-2013 RN Pacaya - Samiria, informa que las especies arbóreas no maderables que tienen permiso de extracción y de comercialización son: “Aguaje” (*Mauritia flexuosa L. f.*), “Huasaí” (*Euterpe predatoria*) y “Shebón” (*Attalea butyracea*). Esta vegetación compone hábitats de nutrientes y zonas de protección para especies de fauna de gran importancia como el “Tapir o Sachavaca” (*Tapirus terrestres*), “Sajino” (*Tayassu pecari*), “Huangana” (*Tayassu pecari*), los Guacamayos, Loros, y Roedores gigantes entre ellos el “Ronsoco” (*Hydrochaeris hydrochaeris*), el “Majás” (*Agouti paca*) y “Añuje” (*Dasyprocta variegata*).

Es por ello por lo que la disminución de área boscosa de las especies de aguajales y chontales amenaza los procesos biológicos de estos bosques. La disminución en la producción de semillas por la depredación de especies arbóreas tiene un gran impacto en la variabilidad y distribución genética. Se han identificado las malas prácticas realizadas que amenazan la reproducción naturales y propagación de la vegetación, las cuales son: tala indiscriminada de árboles, falta de estrategias de reforestación, cambio de uso de suelo, falta de diversificación de actividades económicas, falta de control de recursos naturales.

En la figura 9 se muestra la producción de la actividad pesquera durante el 2014 al 2017 en la RNPS; de la cual, en el río Ucayali, zonas de humedales y bosques inundables semipermanentes albergan mayor cantidad de peces.

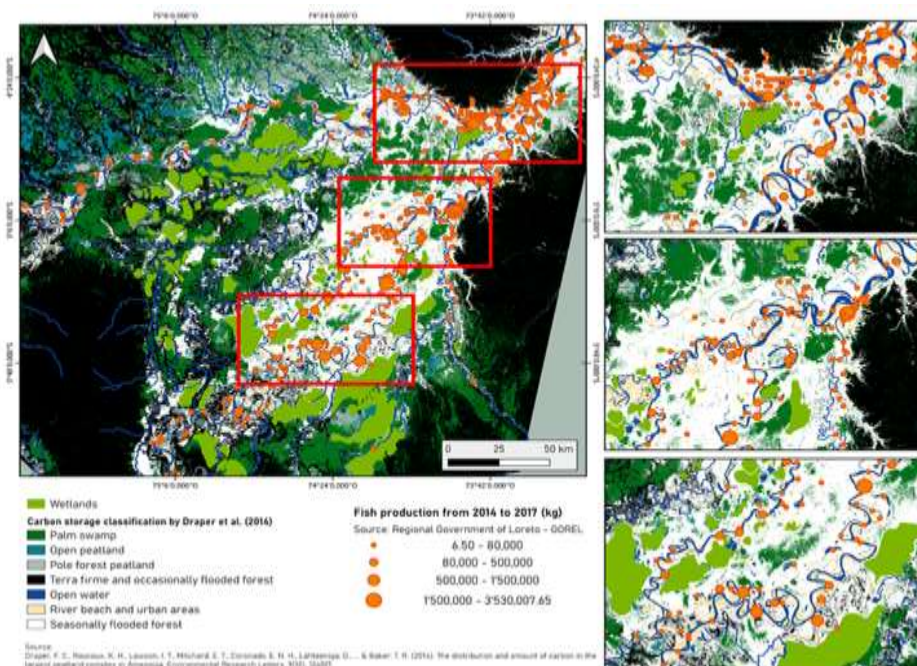


Figura 9. Actividad pesquera en la RNPS durante 2014 al 2017 con la clasificación del almacenamiento de carbono

Fuente: Regional Government of Loreto, Draper et al., 2014

### 2.7.2. Ciclo reproductivo de los peces comerciales en la RNPS

El boletín de WCS (figura 10) proporciona información de los ciclos de vida de las especies de peces más comerciales de la RNPS, determinaron que están altamente relacionados con los ciclos hidrológicos (vaciante y creciente), como el boquichico, llambina, carachama entre otros. En la cuenca del Pacaya encontraron tamaños de boquichico (*Prochilodus nigricans*) por encima de la talla de la primera madurez sexual, indicando que dicha cuenca posiblemente sea el refugio de adultos, los cuales migran al río Puinahua para reproducirse (Wild Conservation Society, 2017).

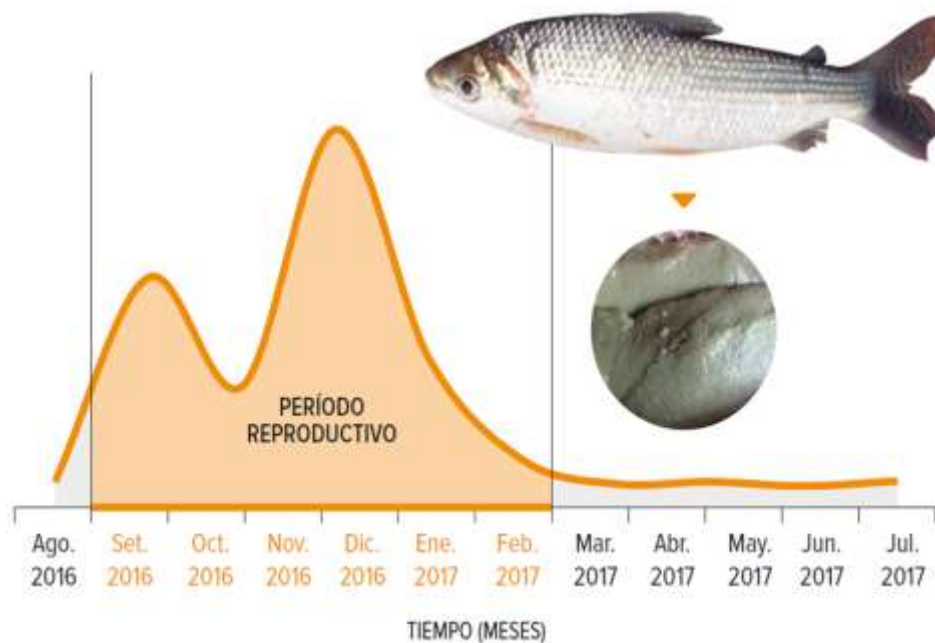


Figura 10. Periodo reproductivo de boquichico en el año hidrológico 2016 - 2017

Fuente Wild Conservation Society, 2017

Se reportó que las hembras y los machos inician el desarrollo de sus gónadas entre septiembre y febrero, entre estos meses encontraron boquichicos con huevo y se conoce que se reproducen una vez al año. Durante el inicio de las lluvias, encontraron ejemplares mayores a 24 cm (Wild Conservation Society, 2017).

La llambina (*Potamorhina altamazonica*) que no es muy comercial en la cuenca del Pacaya, en el boletín de WCS (figura 11) reportaron que tuvieron que realizar pescas experimentales para el estudio sobre su relación con el ciclo hidrológico. Las hembras y los machos inician el desarrollo de sus gónadas entre los meses de septiembre y febrero, entre estos meses se encontraron llambinas con huevo y se reproducen una vez al año. Durante el inicio de



las lluvias, se registraron ejemplares mayores de 16 cm y también salen al río principal para reproducirse como los boquichicos (Wild Conservation Society, 2017).

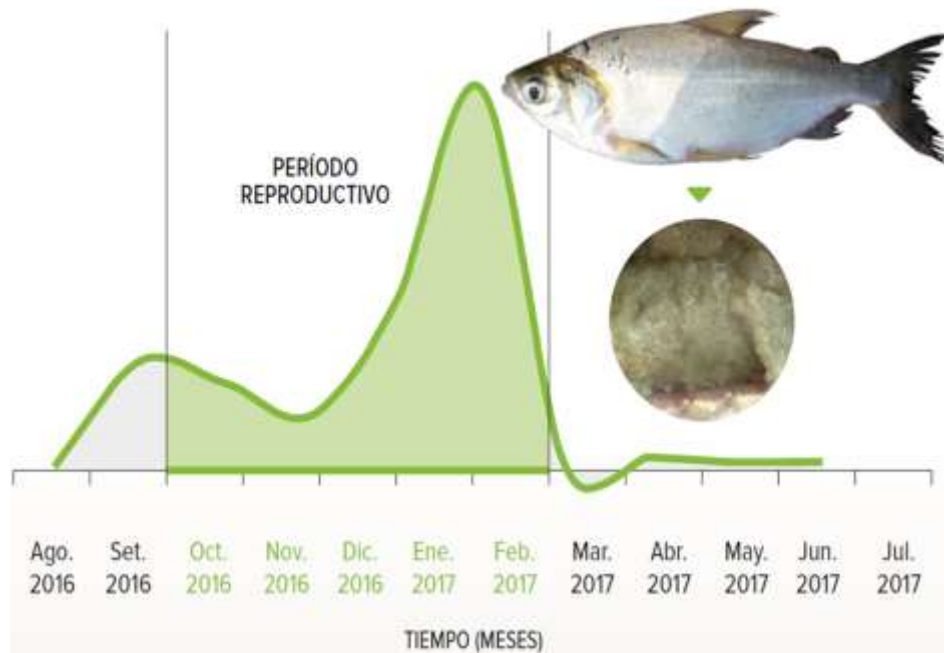


Figura 11. Periodo reproductivo de llambina en el año hidrológico 2016 - 2017

Fuente: Wild Conservation Society, 2017

Por último, en el también reportaron que el 100% de los individuos de carachama (*Pterigoplichthys pardalis*) encontrados en la cuenca del Pacaya ya habían desovado por lo menos una vez (figura 12); según estudios de otros investigadores en el año 2008, esta especie está apta para reproducirse a partir de 20.9 cm y se reproduce más de una vez al año encontrándose dos picos reproductivos en el mes de octubre y enero, esto ocurre debido a que los huevos que quedaron del primer desove vuelven a desarrollarse para ser desovados en el siguiente periodo, presentando el vientre abultado y huevos diferenciados (Wild Conservation Society, 2017).

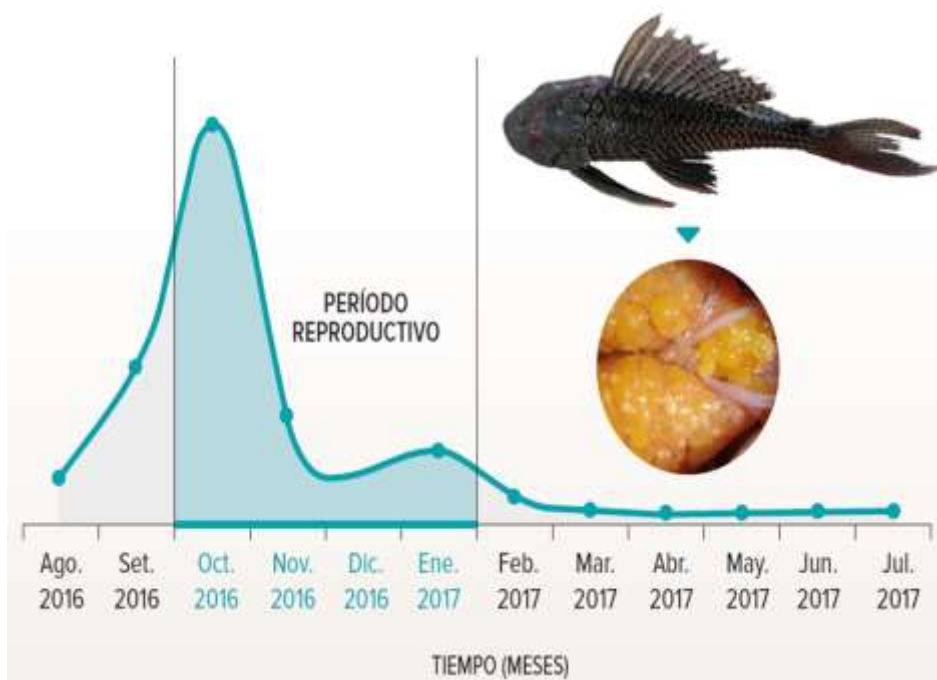


Figura 12. Período reproductivo de carachama en el año hidrológico 2016 - 2017

Fuente: Wild Conservation Society, 2017

Se reportaron que los meses de octubre y enero son los meses en que se reproduce la carachama, entre estos meses se encontraron carachama con huevo presentando desoves parciales y encontraron ejemplares mayores de 20 cm donde se reproducen en las cochas y en el canal principal del río (Wild Conservation Society, 2017).

### 2.7.3. Influencia de la dinámica fluvial en la flora

Los bosques húmedos tropicales están ubicados a menos de 500 m de altitud, y corresponden al 45% de área del territorio peruano. El bosque más bajo se encuentra al norte del Perú, en la provincia de Loreto. La RNPS, como se puede apreciar en la figura 13, se ubica precisamente dentro de estos bosques en el llamado Bajo Ucamara, que recibe su nombre porque es atravesado por los ríos Marañón y Ucayali. Su característica estructural distintiva, y su topografía mayormente plana, han creado un área con muchos lagos arcoíris (Rodríguez et al., 1995) y también una arquitectura forestal distintiva. Por ello, encontramos que el 39% del área de la Reserva corresponde a pantanos y ciénagas, el 31% a bosques húmedos y el 14% a bosques ribereños, el porcentaje restante corresponde a zonas de bosques escalonados o áreas de cerros, como se muestra en la figura 14 (CDC, 1993a) (Vásquez y Tovar Ingar, 2007).

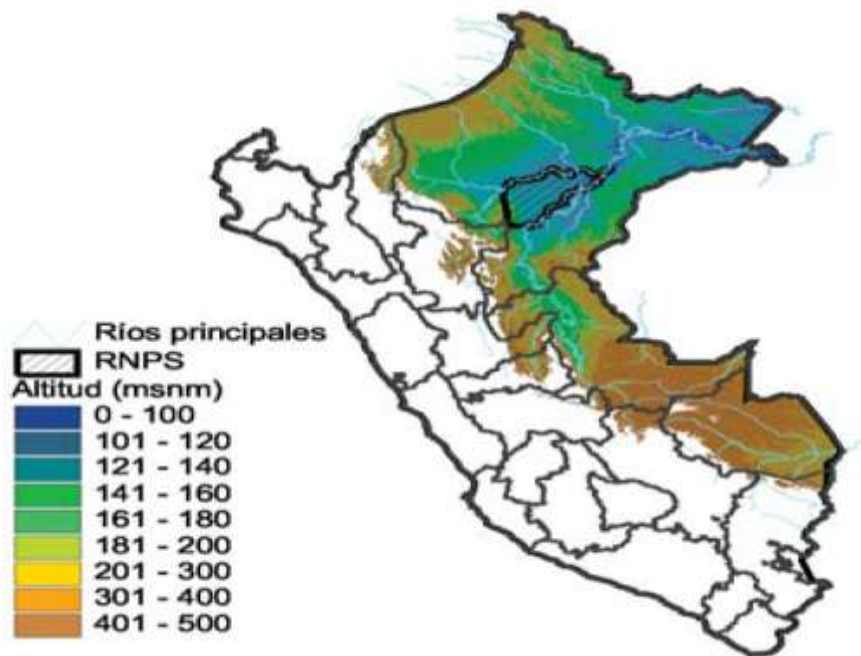


Figura 13. Los bosques tropicales (< 500 msnm) y la RNP

Fuente: Vásquez y Tovar Ingar, 2007

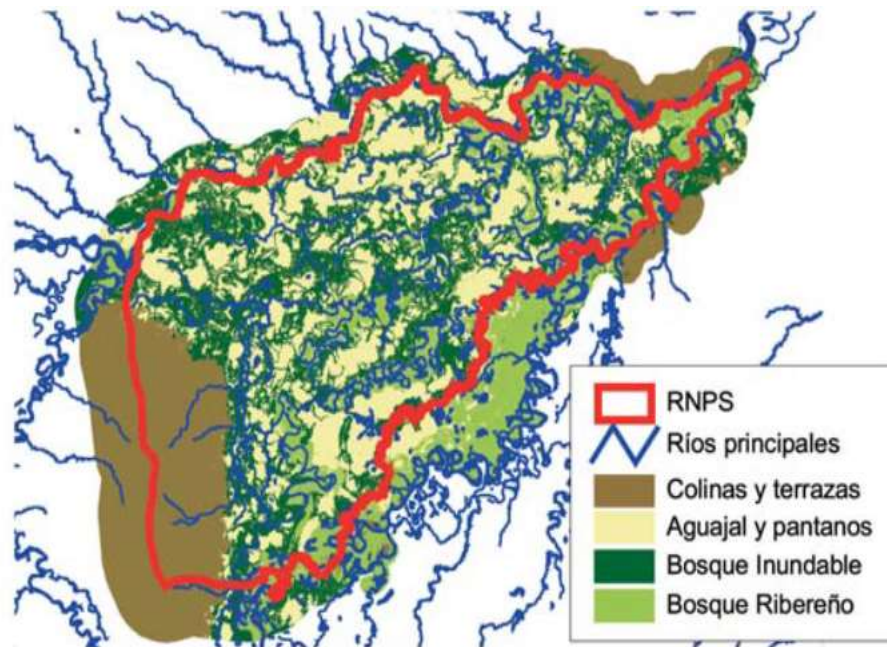


Figura 14. Tipos de bosques de la RNPS

Fuente: Vásquez y Tovar Ingar, 2007

El área ubicada en la zona baja es denominada como depresiones de Ucayali, cuya apariencia excepcionalmente plana y la frecuencia de precipitaciones, contribuyen a que durante períodos una parte importante de la Reserva se sumerja significativamente. Períodos de crecidas de los ríos son en los meses de noviembre a mayo. Las variaciones del nivel del agua cambian según la estación seca (junio - octubre). Por ejemplo, los niveles de los ríos en Ucayali

pueden cambiar hasta 11.2 metros por año, según datos en la Estación de Requena del SENAMHI; el río Marañón (Estación San Regis) cambia hasta los 9.6 metros (J. L. Judío, com. Fardi 2007). Los datos indican que el Marañón cambia en promedio 7.2 metros, mientras que el Ucayali varía 8.8 m (software HYBAM). En los ríos de la reserva, las condiciones de variación del nivel de agua son menor, según datos obtenidos en la Estación Cahuana, del río Pacaya, el cambio es de 6 m. (Soini, 1982) (Vasquez y Tovar Ingar, 2007).

Una vez finalizada la temporada de crecida, los niveles de agua bajan y las playas costeras parecen un espacio abierto que será el hogar de especies pioneras que se benefician de los suelos ricos en nutrientes traídos por los sedimentos de los ríos. La formación de complejos ribereños, donde las plantas más viejas están lejos del lecho del río y las más nuevas están más cerca de él, son frecuentes en estos ecosistemas. La vegetación original es reemplazada paulatinamente, y ocurren procesos que conllevan a la formación de un bosque maduro. Esta evolución de un ecosistema es denominada sucesión vegetal (Vasquez y Tovar Ingar, 2007).

Una investigación desarrollada en las tierras bajas de Jenaro Herrera menciona que la caña de azúcar silvestre (*Gynerium sagittatum*) es capaz de soportar la estacionalidad de fuertes lluvias e inundaciones. Asimismo, especies como el tahuampa gramalote (*Paspalum fasciculatum*) y el capo gramalote (*Echinochloa polystachya*) también son capaces de tolerar inundaciones (Lamott, 1990). La caña brava es una especie que debido a sus fuertes raíces y tallo es capaz de amortiguar las corrientes de agua y servir de protección para otras especies, y actuando por filtro de las partículas de sedimentos que posteriormente quedan retenidas y forman reservorios (Lamotte, 1990) (Vasquez y Tovar Ingar, 2007).

Aunque las especies de árboles pioneros son principalmente malas hierbas, algunas especies de árboles pioneros también han comenzado a formarse por sí solas, y algunas pueden crecer rápidamente hasta una altura de hasta 8-10 metros en un lapso de 3 años. Posteriormente, estas especies de árboles se reemplazaron por los de crecimiento más lento, pero más grandes y longevas (Terborgh, 1992). Gradualmente, la estructura del bosque se fue complejizando, por ejemplo, aquí aparecen enredaderas y plantas aéreas, que no estaban presentes (Kaliolla et al., 1993). La estructura de las especies arbóreas de tierras bajas está fuertemente asociada por la sucesión; los estudios de composición vegetal marcan la diferencia, por ejemplo, entre regímenes de descanso alto y bajo. Experto como Nebel et al. (2000) sugieren que el primer lote será la siguiente etapa después del modelo de descanso bajo (Vasquez y Tovar Ingar, 2007).

Una investigación de Arboretum Gennaro Herrera, observó los estados morfológicos de la especie, encontrando que el mayor número de las plantas suelen florecer entre los meses de

julio y octubre, entre la época más seca y la época con aguas bajas. En la figura 15 se puede ver a las especie *Pucuna caspi* y en la figura 16 se muestra el resultado de la cantidad de frutos y entre marzo y mayo se produjo la mayor cantidad, siendo en los meses de mayor precipitación (*Iryanthera tricornis*) (Vasquez y Tovar Ingar, 2007).

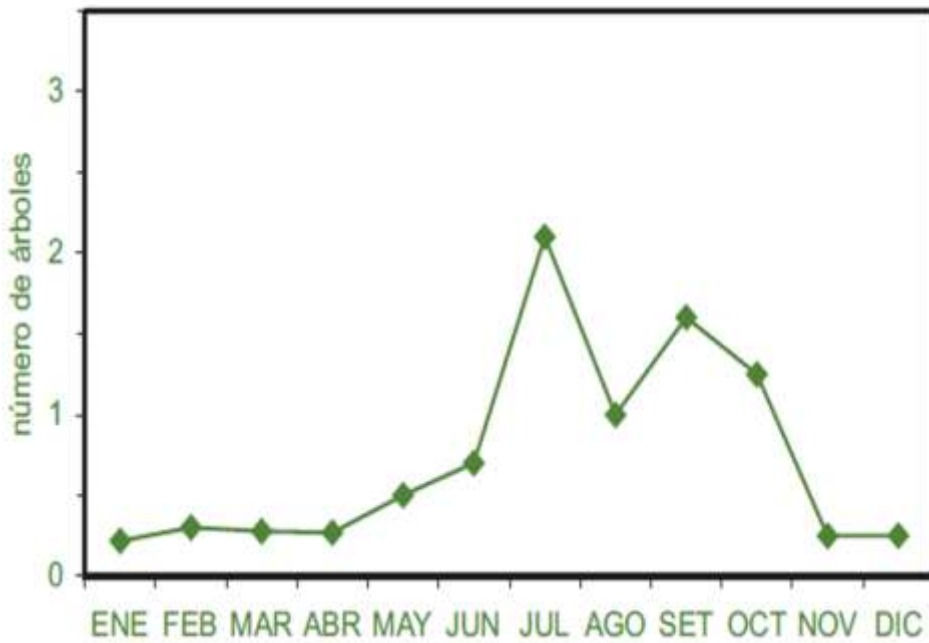


Figura 15. Promedio mensual de árboles en diez años de observación que iniciaron la floración

Fuente: Gautier, L. y R. Spichiger, 1986

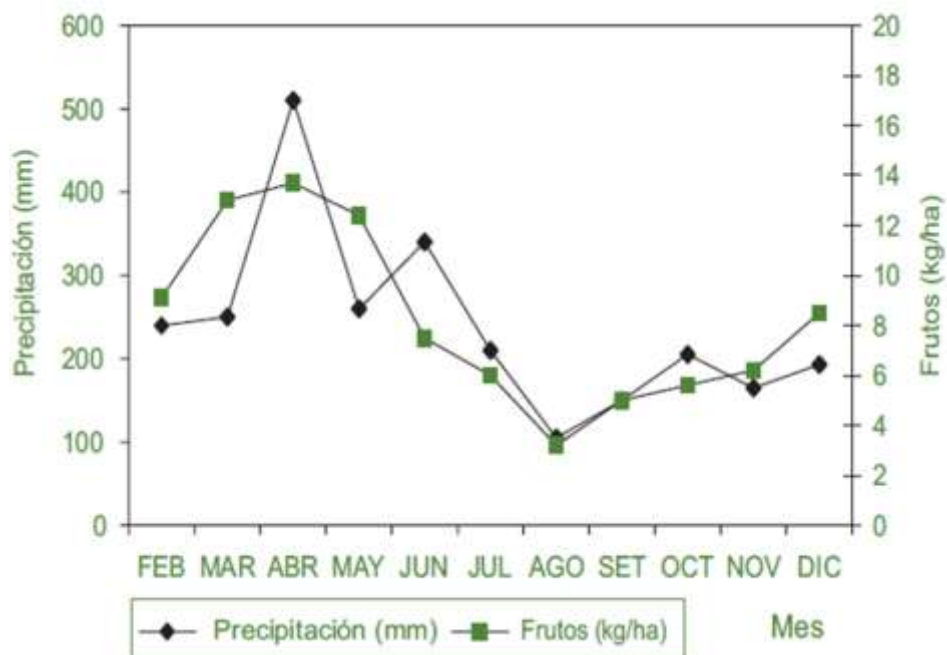


Figura 16. Comparación entre la precipitación y la producción de frutos mensual basado en el peso de frutos, semillas y cáscaras

Fuente: Garber, 1993

#### 2.7.4. Influencia de la dinámica fluvial en la fauna

Uno de los principales cambios asociados a la dinámica del agua es el área disponible para el desarrollo de la vida silvestre, y a pesar de que no hay estimaciones precisas de la cantidad de tierra presente para cada estación del año, se sabe que algunos animales reducen sus áreas de propagación durante las inundaciones y se congregan en áreas de restingas (Vasquez y Tovar Ingar, 2007).

Podemos encontrar entre dichas especies: el bovino (*Pecari tajacu*) y el ciervo colorado (*Mazama americana*), cuyas dietas dependen del acceso a fuentes de alimento. El autor Bodmer (1989) concluyó que las dos especies mencionadas experimentan una alteración en su conducta alimentaria entre la estación seca y la estación alta. La figura 17 muestra la alimentación del ciervo colorado en época seca tuvo una proporción mucho mayor de consumo de frutas que la dieta en la época alta; se encuentra un patrón similar para el cuello bovino (figura 18). De acuerdo con Bodmer (1989), la extensión de la inundación del bosque será un limitante para poder acceder a estos frutos (Vasquez y Tovar Ingar, 2007).

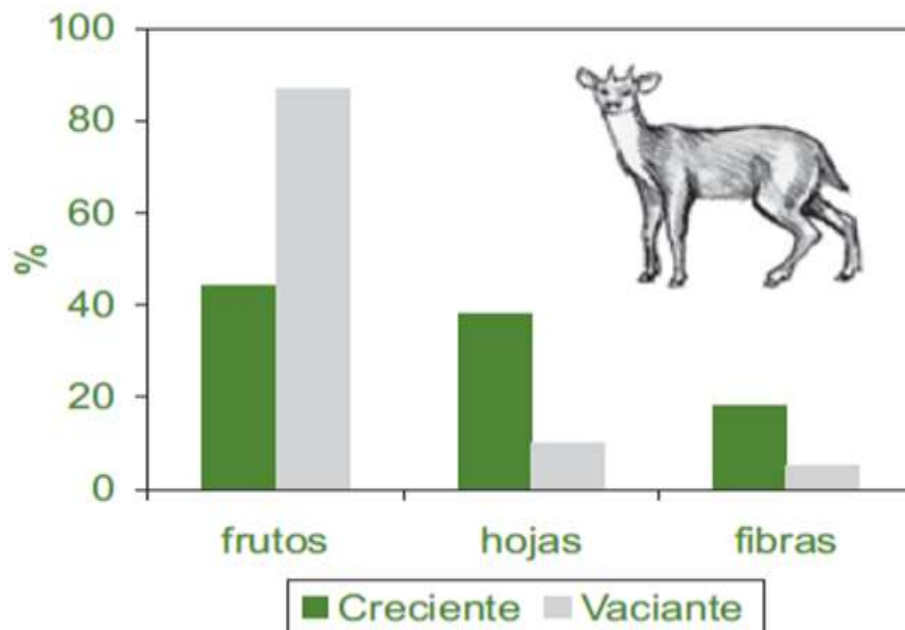


Figura 17. Composición de la dieta del venado colorado

Fuente: Bodmer, 1989

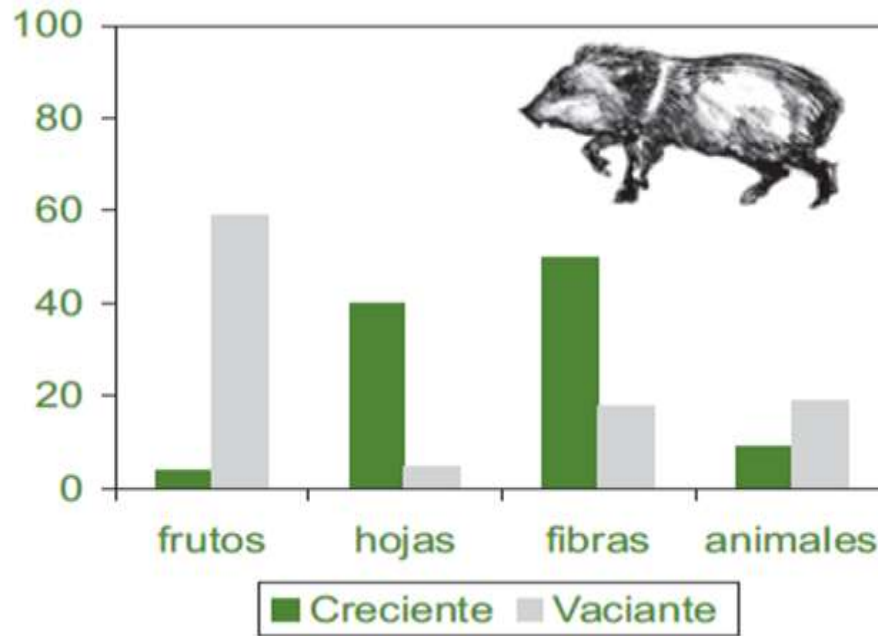


Figura 18. Composición de la dieta del sajino

Fuente: Bodmer, 1989

Por otro lado, el mismo estudio también mostró que los tapires (*Tapirus terrestris*) y los pecaríes blancos (*Tayassu peccari*) no cambiaron su dieta entre la temporada alta y baja. La danta, debido a su comportamiento semiacuático, puede navegar a través de bosques inundables, mientras que la danta blanca, debido a su migración entre las zonas altas y bajas, llega a zonas con alta diversidad de frutos. Así, estos ungulados tienen dos estrategias para adaptarse a los cambios ambientales: por un lado, los cambios en la dieta y los movimientos, por otro, ya sea por el medio acuático o por los genes (Vasquez y Tovar Ingar, 2007).

En cuanto a las especies de fauna de primates, algunos prefieren habitar bosques de tierras secas, y también hay los que prefieren los bosques de humedales. Por lo tanto, se ha informado una alta densidad de ruseñores (*Saguinus sp.*) y monos choros (*Lagothrix lagotricha*) en tierras secas; por otro lado, los monos aulladores (*Alouatta seniculus*) y monos primos (*Saimiri sciureus*) registran mayor abundancia en las llanuras aluviales o Varzeas (Pierce, 1997). Dentro de la diversidad de fauna de la selva también encontramos, por ejemplo, la cigüeña es dominante en los humedales, come frutas e insectos sin mucha dificultad en cualquier época del año, también tiene una amplia gama de alimentos verticales y prefiere *Ficus*, que abunda en los bosques de tierra húmeda (Peres, 1997) (Vasquez y Tovar Ingar, 2007).

Hay diferencias entre los tipos de comunidades de primates que viven en humedales y bosques tropicales, se diferencian también por el número de especies y biomasa, como se puede apreciar en la figura 19. Hay más especies en bosques de tierras secas que en humedales; por otro lado, con respecto al valor de biomasa, en los bosques inundables se presenta a

aproximadamente el doble que en los bosques secos. La presencia de gran variedad de especies en las planicies de inundación es gracias a la alta riqueza de producción de frutos. La alta disponibilidad de frutos hace que la cadena alimentaria sea más atractiva y se genere mayor diversidad de fauna en la zona (Vasquez y Tovar Ingar, 2007).

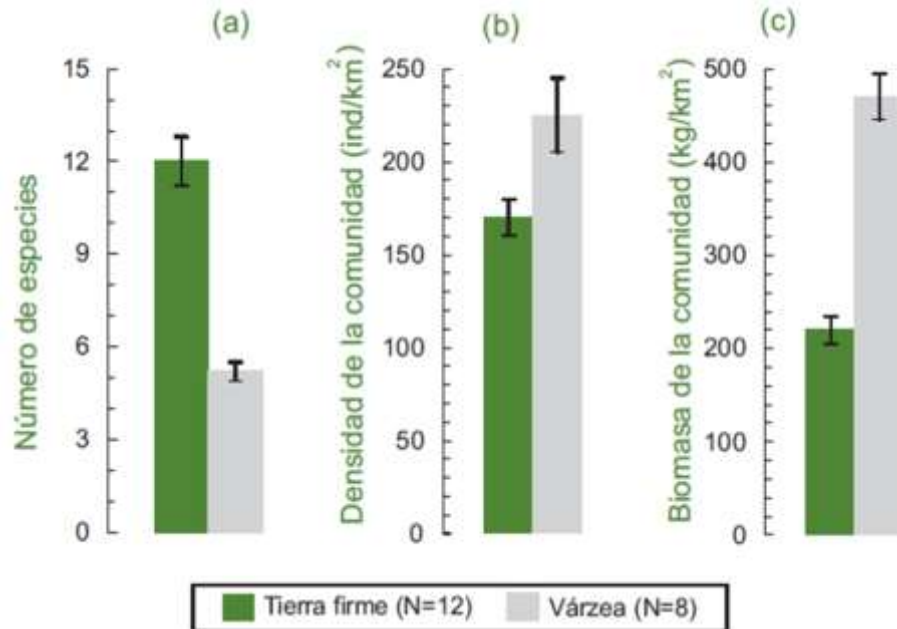


Figura 19. Diferencias entre número de especies y biomasa de primates entre bosques de tierra firme y várzeas en el río Juruá (oeste de Amazonía brasileña)

Fuente: Peres, 1997

Con respecto a los mamíferos acuáticos, encontramos al manatí (*Trichchus inunguis*), que habita en grandes lagos y es atraído por la variedad de plantas y plantas flotantes, además, durante la temporada suelen migrar al bosque inundable. Sin embargo, durante la estación seca, su hábitat se restringe a ciertos tramos de ríos o se limitan en habitar los lagos remanentes, donde esperan que suba el nivel de agua (Best, 1984) (Vasquez y Tovar Ingar, 2007).

También encontramos especies de tortugas, las cuales dependen de la época seca para la aparición de playas para su anidación. En la RNPS encontramos a la taricaya (*Podocnemis unifilis*) que pone huevos en las playas y en las orillas de los lagos (Soini, 1986). Para la anidación de las tortugas es muy importante tener en consideración el sustrato de la zona de desove, el cual depende los nutrientes traídos por los sedimentos del río. El estudio de Soini realizado en un tramo del río Pacaya en la zona de Cahuana identificó que era la primera vez que las tortugas estaban presentes en zonas donde parte de las playas estaban sumergidas, incluso si el tipo de sustrato es arenoso o arcilloso se realiza el desove. La tortuga charapa (*Podocnemis expansa*) y el cupiso (*Podocnemis sextuberculata*), se encuentran en época seca



cuando las playas están completamente expuestas y depositan los huevos sobre sustratos arenosos. El estudio de Soini también señala que se presenta estratificación vertical en las playas, con nidos de cupiso en las partes bajas de la playa, taricaya en las partes media y alta, y charapa en las partes altas (figura 20) (Vasquez y Tovar Ingar, 2007).

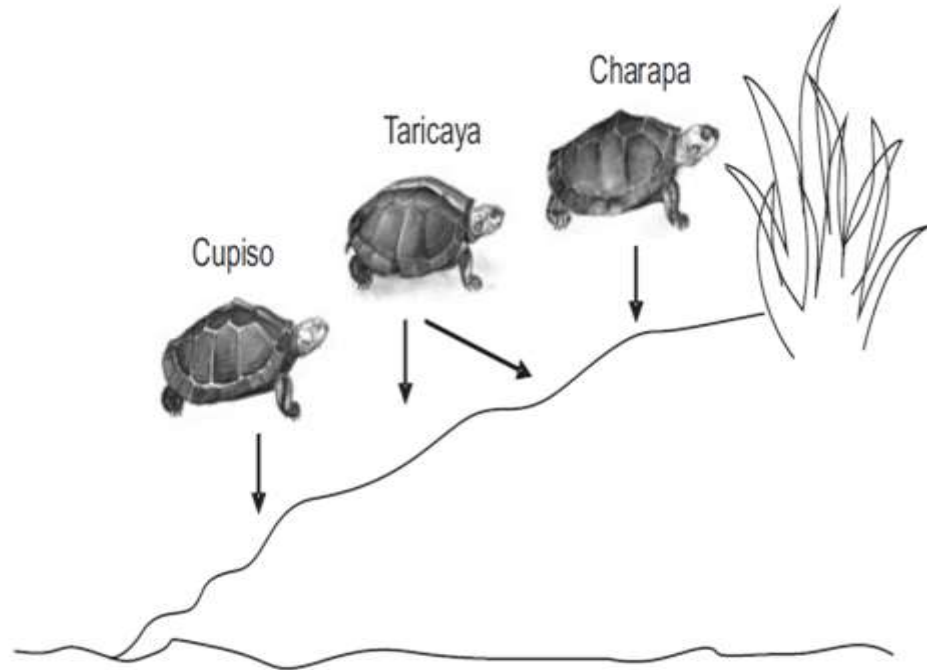


Figura 20. Lugares de desove de cupiso, taricaya y charapa

Fuente: Soini, 1986

Cuando los niveles de agua experimentan cambios, puede haber impactos negativos en las especies de tortugas. Si el año tiene un período de crecidas moderadas, es decir, el caudal del río no aumenta mucho, entonces es posible que se presente el fenómeno de no llevar mucha arena y llevar sólo limo, y no acumular limo, lo que lleva a la aparición de playas; Además, en ausencia de inundaciones, las playas antiguas pueden cubrirse fácilmente con vegetación. Dicho suceso ocurrió a principios de la década de 1990 en la Estación Cahuana (Soini, 1992). Por el contrario, si la inundación ocurre temprano en el año, los nidos cercanos a la costa se inundarán antes de que eclosionen los huevos (Vasquez y Tovar Ingar, 2007).

El Servicio Nacional de Areas Naturales Protegidas a elaborado el Plan de Manejo de la Charapa el cual tiene como finalidad la recuperación de las poblaciones de esta especie dentro de la RNPS, y de las comunidades aledañas a la reserva. El manejo sostenible de las áreas de desove implica el traslado de huevos de las tortugas para su reanidación alejándolas de potenciales peligros de inundación que inundan las playas de desove.

Otra de las especies que sufre disminución por la creciente de ríos dentro de la reserva es el ronsoco (*Hydrochaeris hydrochaeris*, se tiene un registro excepcional de mortandad

ocurrido en un evento de crecidas en el año 1986 del río Pacaya (Soini, 1988). El evento ocurrido en dicho año afectó de forma significativa la población de ronsocos, a pesar de ser una especie semiacuática. Esto se debió a que hubo mayor área inundada, las restingas más altas fueron inundadas, disminuyeron el área del hábitat de ronsoco y limitando su movilización (Soini, 1988). En condiciones típicas de inundaciones, las poblaciones de ronsoco no se ven afectadas, como se observa en la figura 21 (Vasquez y Tovar Ingar, 2007).

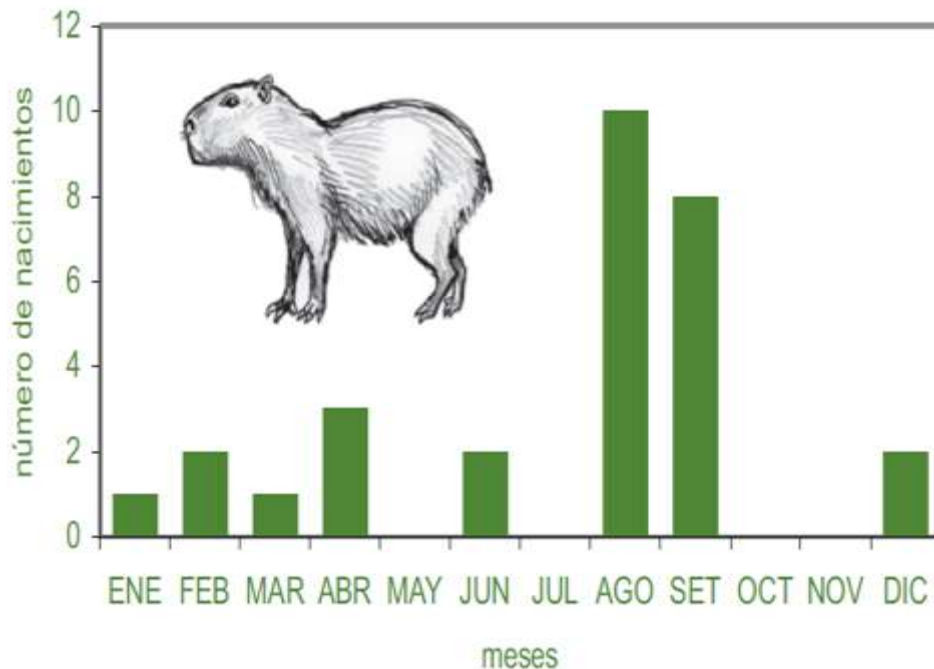


Figura 21. Distribución mensual de nacimientos en la población de ronsocos en Cahuana

Fuente: Soini, 1988.

### 2.7.5. Modelamiento hidrodinámico e hidrológico

El trabajo realizado por el CITA-UTEC (2020) de sensoramiento remoto en la RNPS, determinaron que la distribución de zonas inundables, donde se identificaron los tramos de ríos abandonados conocidos como paleocauces y las conexiones laterales hacia la Reserva. Se analizaron las variaciones de niveles de agua y velocidades en épocas de transición, vaciante y creciente. La simulación del modelo bidimensional con un caudal al 50% para el año hidrológico 2018 - 2019 en el río Ucayali y Marañón (figura 22), encontraron que el canal del Puinahua mantuvo la conectividad lateral hacia la Reserva con un mayor aporte de flujos por parte del río Ucayali a comparación del río Marañón, pasando primero por cochas que se encuentran inundadas durante todo el año (figura 23) y así conectándose con el río Pacaya en épocas de crecidas, al reducir el caudal de estos ríos al 50% se reduce la llanura de inundación. Por otro lado, con la simulación en condiciones normales, la conectividad entre los ríos aportantes, cochas y llanura de inundación prevalecen durante todo el año.

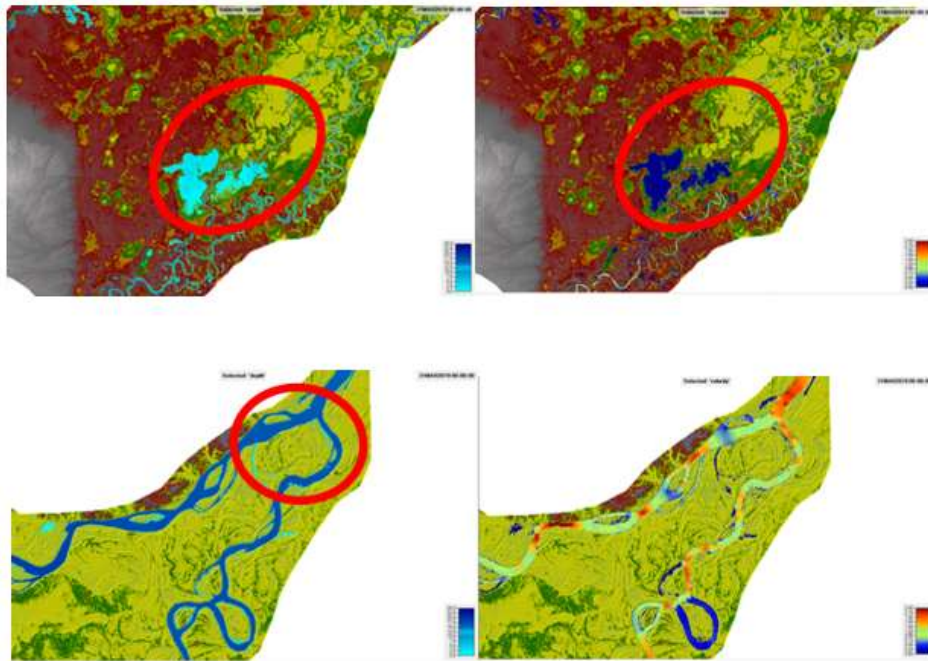


Figura 22. Simulación de la profundidad y velocidad con la mitad del registro del hidrograma de caudales para el río Ucayali

Fuente: CITA-UTEC, 2020

En este estudio se consideró los valores de caudal interpolados por mediciones en campo con datos de niveles de agua de las estaciones Lagunas, San Regis, Contamana, San Lorenzo y Requena.

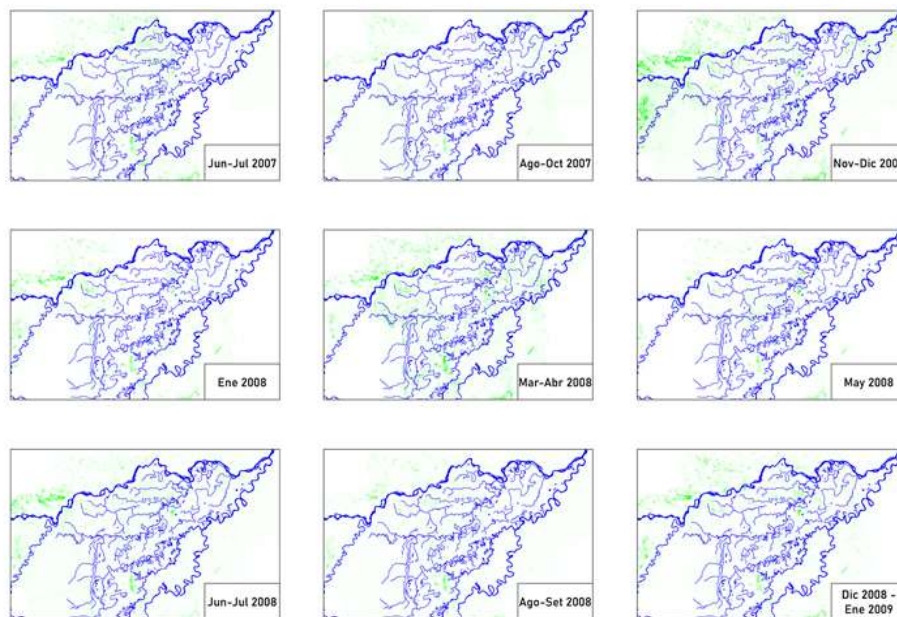


Figura 23. Análisis de inundabilidad entre el periodo de junio 2007 a enero 2009

Fuente: CITA-UTEC, 2020

Reis et al. (2018) realizó un estudio de regímenes de inundación en la RNPS a través de sensoramiento remoto, donde menciona que se caracteriza por los regímenes de inundación lateral (figura 24).

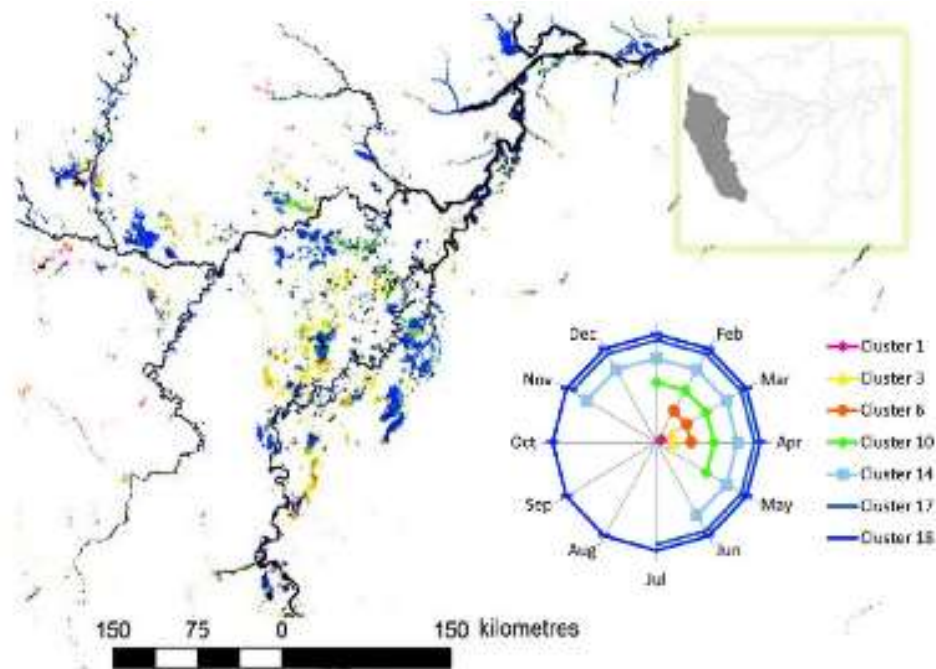


Figura 24. Regímenes de inundación en la RNPS

Fuente: Reis et al., 2018

La ocurrencia y temporalidad de las inundaciones como se muestra en la Figura 25 del trabajo de Park y Latrubesse (2016) caracteriza la conectividad hidrológica e hidrodinámica en los ecosistemas amazónicos (Reis et al., 2019; Castello et al., 2013; Wilson et al., 2007). Reis et al. (2019) determinaron que los patrones de inundación en los humedales por parte de las lluvias locales están relacionados con factores externos a escala regional y al cambio climático.

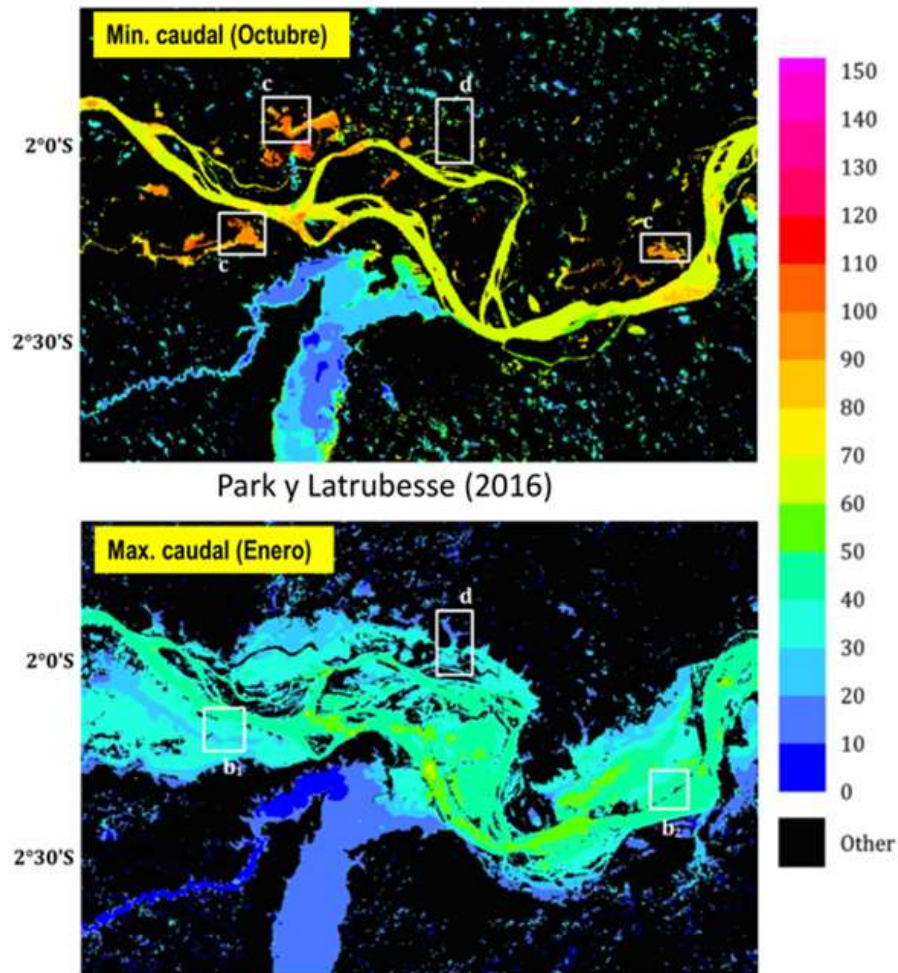


Figura 25. Variación temporal del flujo de caudales

Fuente: Park y Latrubesse, 2016

Se puede apreciar en la Figura 26 y la figura 27, la diferentes muestran la relación entre cobertura vegetal y su variación con respecto al régimen de inundación para los ciclos hidrológicos máximos y mínimos. Se muestra de color celeste y blanco las áreas de inundación. También se observa la variación de la especie de vegetación predominante, para época seca se encuentran arbustos no inundables y en época húmeda, macrófitas. También, se observa la conectividad de los cauces abandonados y cochas (oxbow lakes) con el cauce principal y sus afluentes.

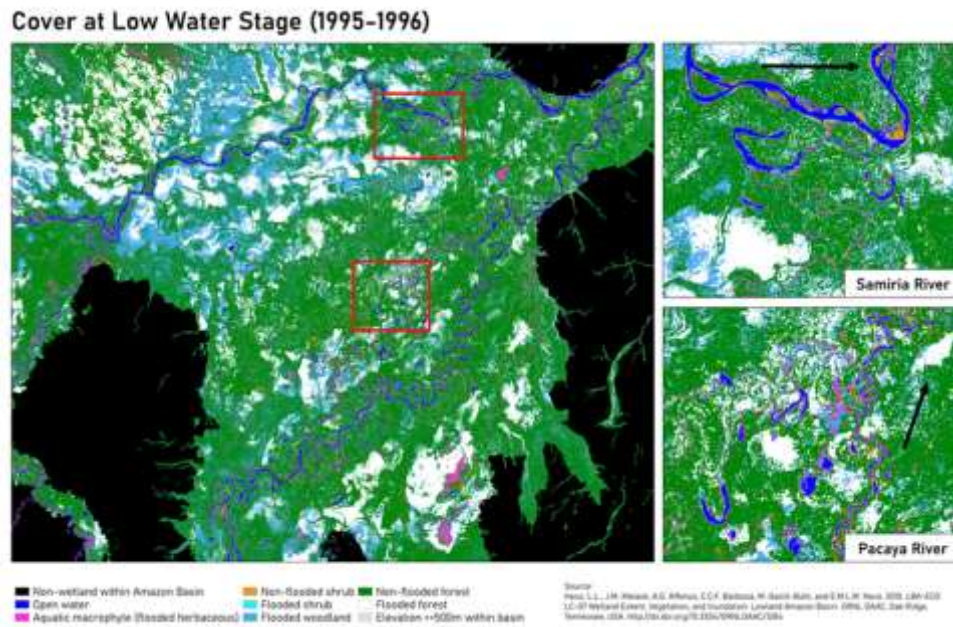


Figura 26. Cobertura durante temporada seca para el periodo 1995/1996

Fuente: Hess et al., 2015

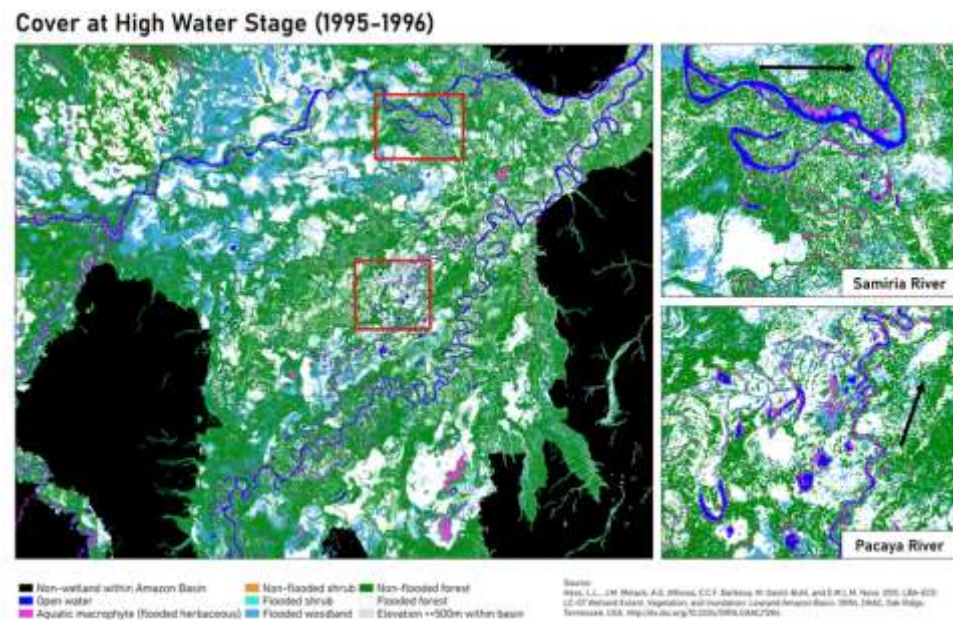


Figura 27. Cobertura durante temporada húmeda para el periodo 1995/1996

Fuente: Hess et al., 2015

De acuerdo con Gloor et al. (2013) los escenarios hidrológicos se determinan de acuerdo con el aumento del caudal máximo y disminución del caudal mínimo analizadas para la estación Óbidos de Brasil. Con la cual, se determinó la tendencia de frecuencia e intensidad de los eventos hidrológicos extremos, que en el estudio se indica que ocurrió entre 1995 y 2010. En la

figura 28 se muestran los eventos de sequía para los años 1995, 1998, 2005 y 2010 en relación con las descargas y precipitación en el río Amazonas.

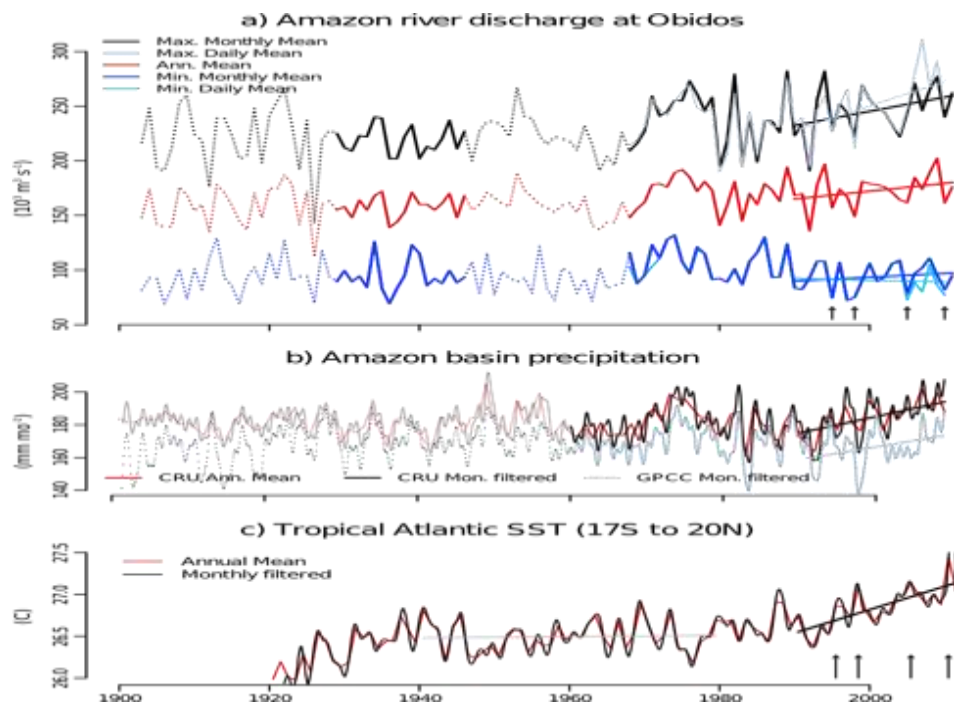


Figura 28. Tendencia hidrológica del río Amazonas en la estación de Óbidos. a) se muestra la descarga mensual media, máxima y mínima anual. b) muestran el registro de sequías críticas

Fuente: Gloor et al., 2013

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Descripción general de la zona de estudio

El estudio consistió en el procesamiento de los datos de batimetría, velocidades y caudales de las campañas de campo de la Marina de Guerra del Perú para el año 2014; y 2018 y 2019 con los datos del CITA-UTEC recolectados en el área de estudio de la Reserva Nacional Pacaya Samiria (RNPS) y en su zona de amortiguamiento, que se encuentra localizado en el departamento de Loreto; entre las provincias de Loreto, Requena, Alto Amazonas y Ucayali (figura 29), entre las cuencas de los ríos Marañón y Ucayali.

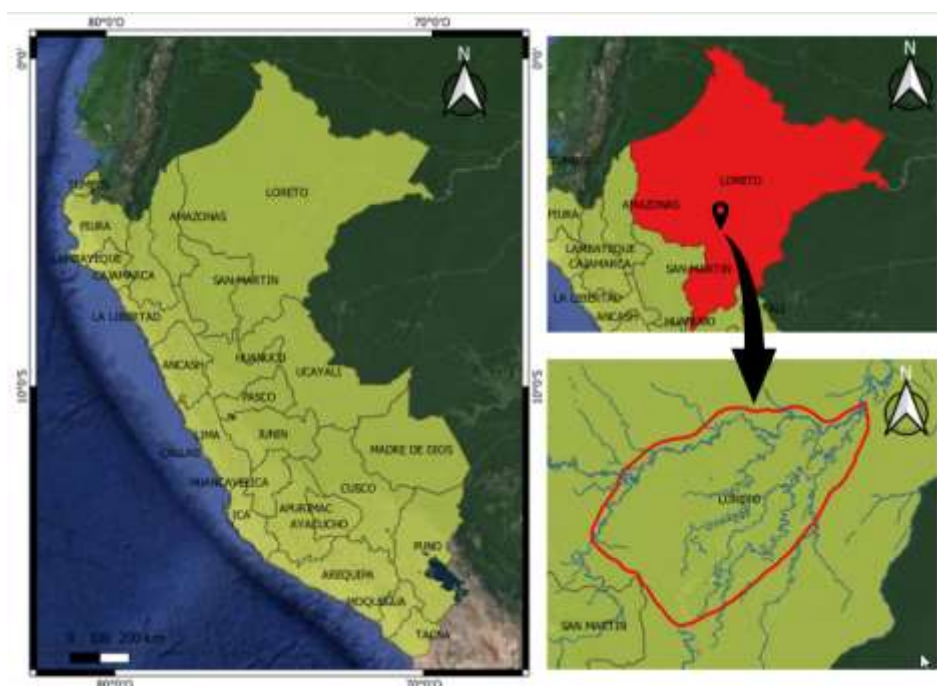


Figura 29. Ubicación política de la zona de estudio

Fuente: Página Web GPS Perú - Shape de la delimitación departamental

#### 3.1.1. Hidrología

El análisis del ciclo hidrológico se realizó en base a los registros de datos disponibles, para la zona de estudio y el área adyacente, de estaciones hidrométricas y meteorológicas (figura 30).





En la figura 32 se puede observar los datos históricos de precipitación promedio mensual de un periodo de 30 años en las estaciones meteorológicas de Yurimaguas, Jenaro Herrera, Santa Rita, San Regis, Bretaña y Juancito del SENAMHI que fueron completados por medio del método de CUTOFF que utiliza la naturaleza espaciotemporal de los datos para imputar con precisión y eficacia los valores perdidos (Fang, L. et al., 2014), en el ANEXO II se observa el código en formato R utilizado para realizar la completación de datos. Dicha figura muestra la variación mensual de las precipitaciones con alta y baja intensidad, observándose un comportamiento binomial; es decir, dos picos de precipitaciones entre los meses de diciembre a enero y marzo a abril, respectivamente.

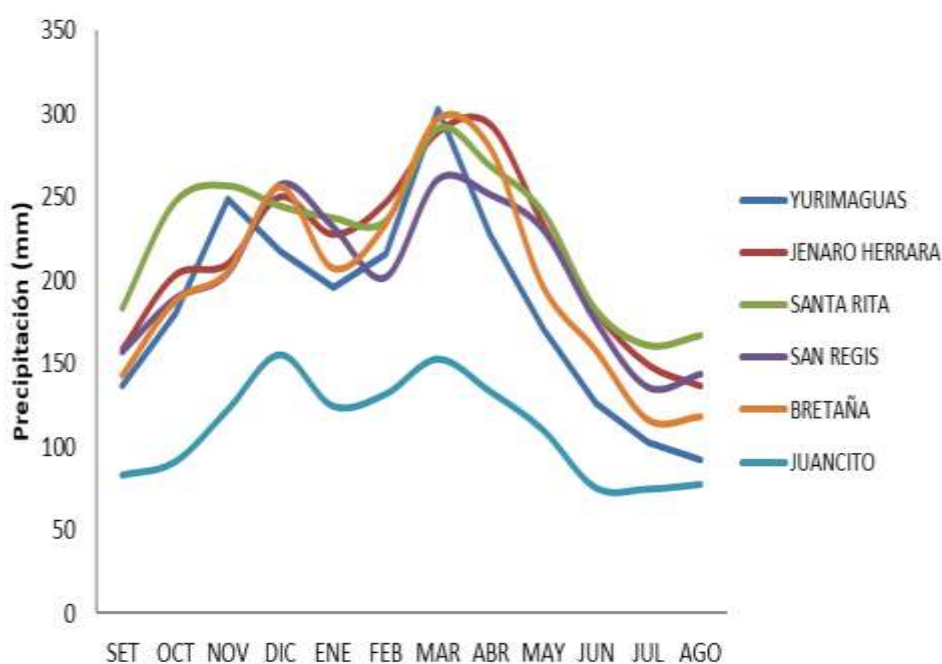


Figura 32. Precipitación promedio versus meses del rango de los años 1985 al 2015. Datos extraídos de SENAMHI

### 3.1.2. Geomorfología

En la figura 33 se muestra la geomorfología en la zona de estudio según la clasificación del INGEMMET, conteniendo diferentes formaciones como: paleocauces, áreas de complejos de orillares antiguos y recientes; islas fluviales, terraza baja y baja aluvial; y llanura amazónica disectada u ondulada.

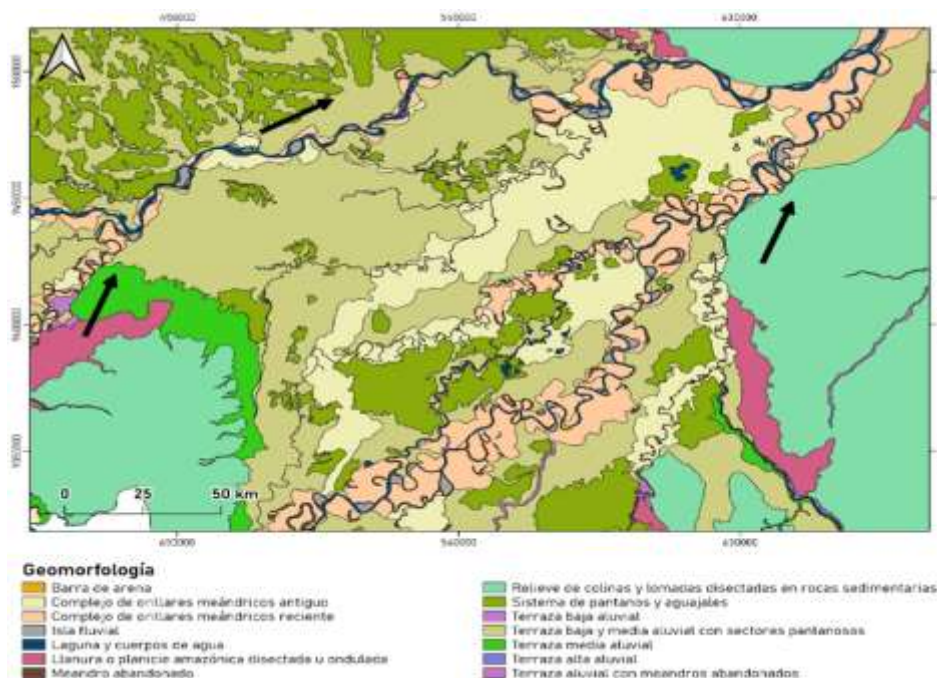


Figura 33. Caracterización geomorfológica de la RNPS. Elaborado en base a datos del INGEMMET

Fuente: CITA-UTEC, 2020

### 3.1.3. Morfología de los ríos

En el trabajo de Marin, J. et al. (2020) se menciona que “en la cuenca amazónica encontramos dos principales tipos de ríos, los meándricos y los multicanales (anabranching). Es muy importante identificar el tipo de río con el que se planea trabajar, pues presentan diferentes patrones de comportamiento en función a los procesos que ocurren en ellos, tales como la acumulación de sedimentos, la avulsión y el corte de meandros, entre otros”.

La principal característica de los ríos meándricos es la de tener un canal principal bien definido y su recorrido es curvilíneo (figura 34.C). Por otro lado, los ríos multicanales (figura 34.B) son aquellos que presentan islas aluviales, que generan la división del flujo para luego volver a conectarse; es así que se forman diferentes patrones de ramificación del flujo interconectados por el mismo patrón de dirección (Frias et al., 2015; Nanson, 2013). También podemos encontrar una clasificación de ríos denominados ríos trenzados (braided) cuya principal característica es la de tener múltiples ramificaciones separadas por pequeñas islas (figura 34.A) (Eaton et al., 2010).



Figura 34. Tipos de ríos principales (A: Río trenzado “braided”. B: Río multicanal “anabranching”. C: Río meándrico)

Fuente: CITA-UTEC, 2021

#### **3.1.4. Cobertura vegetal**

La Reserva Nacional Pacaya Samiria alberga un gran riqueza y variedad de flora y un alto dosel forestal, además, podemos encontrar su vegetación ha sido clasificada según su fisionomía, fisiografía y sus características florísticas de acuerdo a su altura, densidad, suelo y relieve (figura 35).

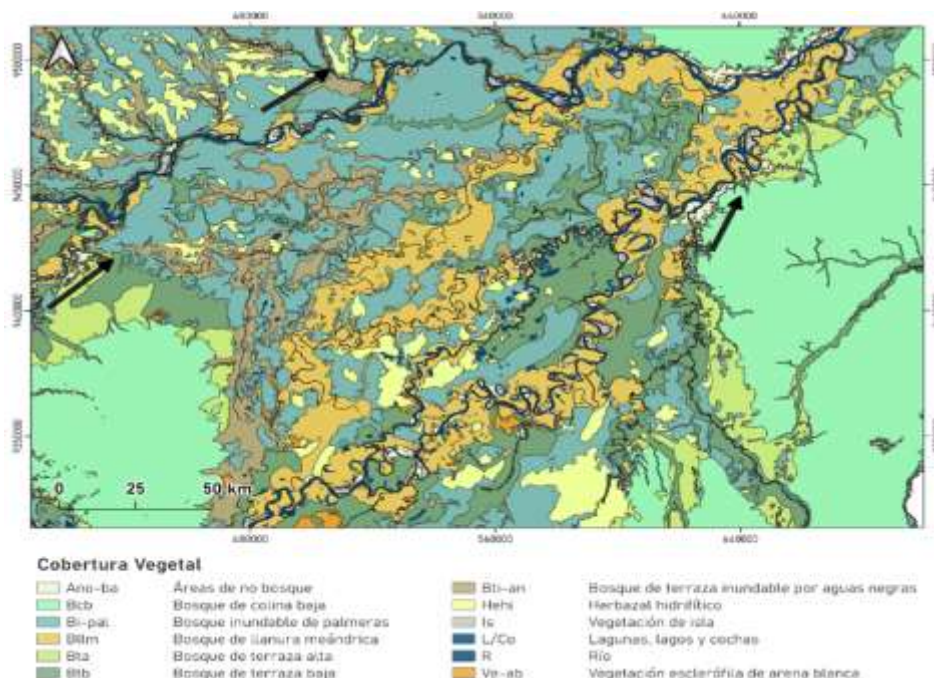


Figura 35. Clasificación de la cobertura vegetal en la RNPS. Realizado a partir de datos del MINAM

Fuente: CITA-UTEC, 2020

Como se puede apreciar en la figura 35, dentro la reserva hay predominancia de la clasificación de bosque inundable de palmeras, esto es gracias a la calidad de suelo que cumple con características del drenaje del suelo, asociado a las crecidas del río, la precipitación y fisiografía de la zona. También podemos encontrar los bosques de llanuras meándricas, que son aquellos que se encuentran en los terrenos aluviales cuyos suelos reciben periódicamente los sedimentos de los ríos. Por otro lado, el bosque maduro es aquel que se ubican más alejados de la orilla del río y presenta una alta cobertura vegetal característica de palmeras, lianas y epífitas. Otra clasificación que podemos encontrar es el bosque de terraza, que, por su topografía plana, posee un suelo con mal drenaje. También tenemos el bosque de terraza alta que posee suelos antiguos de origen aluvial y es característico de un buen drenaje, y con una vegetación que supera los 40 m de altura 1 m de diámetro a la altura del pecho (DAP). Así mismo, el bosque de colinas presenta las mismas características de diámetro y altura con la diferencia de que es este bosque hay predominancia de la especie de palmeras “irapay” (*Lepidocaryum* sp). Finalmente tenemos el sotobosque que presenta menor cantidad de especies latifoliadas y de palmeras “irapay” que pueden llegar hasta los 2 m.

### 3.1.5. Biodiversidad y ecosistemas

La Amazonía peruana es el área con mayor biodiversidad ecológica del país, con una diversidad alfa muy alta, la cual se mide a través de la cantidad de especies que hay en un área

específica, estimándose el número de especies de peces, aves, primates, peces e invertebrados (Pomara et al., 2014). El alto grado de riqueza en biodiversidad que se encuentra en esta zona es gracias a la diversidad estructural vegetativa y de la complejidad de relaciones entre especies codependientes. A ello se le suma el valor ecosistémico de la vegetación que cumple la función de mantener la biodiversidad nativa los bienes y servicios ambientales que otorga por medios de los mutualismos y otras interacciones entre especies.

Se considera que la zona de la Amazonía peruana presenta una alta diversidad beta, la cual se mide a través de la variación de composición de especies desde un área a otra (Gentry, 1988; Tuomisto et al., 2014). La diversidad está asociada con los diferentes sustratos de la zona, como las arcillas y arenas bien drenadas. La diferencia edáfica de suelos da lugar a la gran diversidad en especies de flora, que a su vez está asociada a la variedad de fauna (Fine et al., 2004). Gracias a ello, se encuentran formaciones únicas de la zona occidental de la Amazonía, como es el bosque de arena blanca (Fine et al., 2010).

La región de Loreto es un área crítica frente a los efectos del cambio climático, que amenaza la estabilidad ecológica, sumado a ello los procesos socioeconómicos del hombre genera una demanda extractiva y cambios de uso de suelo que depredan las áreas y amenazas y al flora y fauna nativa. Por otro lado, sufre bastantes presiones de factores externos que pueden influenciar en su modificación estructural. Hay organismos internacionales que ejercen presión para incrementar obras de transporte de grandes barcos (hidrovías) en la región, que implica modificar el curso natural de los ríos; y también presiones para aprobar proyectos de conexión de la ciudad de Iquitos con los sistemas de tranvía o autopistas.

La RNPS está conectada con el sistema de los Andes central y del norte por medios de los ríos transportando sedimentos a través de sus caudales. Además, el ciclo de precipitaciones en las cuencas altas da paso a la gran estacionalidad en los ciclos de inundación. Por ello las inundaciones generan cambios en la conectividad de los cuerpos de agua y de los humedales. Los cambios estacionales de nivel de agua en los humedales tienen relación con los cambios funcionales de los ecosistemas. El transporte de roca, arena y partículas de arcilla de los ríos amazónicos transforma la geomorfología de la zona, depositando sedimentos en lechos, orillas y terrazas.

Los servicios ecosistémicos que encontramos en esta región amazónica son:

- Captura y almacenamiento de carbono: Los flujos del almacenamiento de carbono son propiedades ecosistémicas de los bosques y humedales. Este servicio ambiental resulta

de gran valor para combatir el calentamiento global. Existen varios medios para estimar el stock de carbono, uno de ellos es la teledetección.

- Regulación hídrica: La mantención de los flujos de agua y su movimiento, mediante lo cual guardan relación directa con la erosión y la deposición de sedimentos.
- Producción de alimentos: Un suelo fértil es la base para el desarrollo de la agricultura, sistemas de cultivo-barbecho, y horticultura. Los suelos productivos dependen de los ciclos de inundación ya que a través de estos se renuevan los nutrientes en el suelo; por ello existen conexiones de interdependencia espacial entre la dinámica fluvial y la regeneración del bosque con la producción de alimentos.
- Provisión de insumos: Dada la alta biodiversidad de la zona, la fauna y flora provee de insumos como medicamentos, madera, fibras, entre otros. Los bosques proveen el hábitat para las especies silvestres, y se regeneran gracias a la intervención cíclica de la fauna que polinizan las plantas y dispersan semillas.
- El recurso pesquero: La pesca se realiza principalmente en las cochas cercanas a las comunidades, también se puede solicitar autorización para que desarrollen la pesca en el canal del río Pacaya para el ingreso al Puesto de Vigilancia del SERNANP y en el canal del Puinahua. La dieta basada en pescado abarca un 80% del consumo de las poblaciones de la región Loreto, donde encontramos especies como “boquichico”, “acarahuazú”, “carachama” y “tucunaré”, entre otros.

La RNPS se destaca por sus características hidrográficas y su dinámica fluvial, se identifica por su variedad en su sistema de ríos, cochas y sus diferentes cuerpos de agua. Además, presenta bosques inundables, que, en estaciones de creciente del nivel de agua, se cubren de las aguas de río, entre los meses de octubre y abril; por otro lado, su época de vaciante se da entre los meses de mayo y septiembre. Este ecosistema tiene un clima de la clasificación de bosque húmedo tropical, con una temperatura media anual entre 20. 1° C a 33. 1° C. No se define una estación seca debido a la variación en la distribución anual de precipitaciones (Marengo, 1998, citado en STCP-SUSTENTA. 2005).

De acuerdo con la clasificación empleada por el CDC, UNALM (1993), “las formaciones más importantes para la RNPS por su extensión son los bosques inundables (26.7%) y los aguajales (densos 27.2% y mixtos 9.9%). La Reserva alberga 965 especies de plantas silvestres y 59 de plantas cultivadas, agrupadas en 559 géneros y 132 familias, y provee de importantes especies de valor para la alimentación, construcción, artesanía, leña y

medicina”; la importancia de la RNPS es su diversidad en flora y fauna, donde destaca las extensas áreas ocupadas por “Aguajales” (*Mauritia flexuosa*) encontrándose en asociación con “huasái” (*Euterpe precatoria*) (Kalliola, 1993). Así mismo, el autor Kahn (1991) realizó un estudio sobre los aguajales donde define a los bosques de aguajal como palmerales que habitan las áreas inundadas, y se ubican paralelamente al lecho del río y tienen afinidad por los suelos con substrato arcilloso.

Por otro lado, la fauna de vertebrados de la RNPS constituye 1.025 especies, que corresponde al 27.02% de diversidad en vertebrados del Perú y el 36.30% para la Amazonía; lo que representa la mayor diversidad de esta especie de fauna en la zona este de la Amazonía (Programa de Cooperación Hispano Peruano, 2012).

### **3.1.6. Zonificación**

La Zonificación de la RNPS está basado según los objetivos de conservación de la biodiversidad característica de un bosque tropical húmedo y en el manejo de los recursos naturales de interés ecológico y económico para su uso sostenible. La identificación de zonas de uso es importante para determinar los sectores y recursos naturales donde las organizaciones ejercen influencia a través de sus actividades extractivas; asimismo, permite comprender mejor las características y condiciones de la extracción, elemento necesario para un ordenamiento socio ambiental efectivo (OSPPA “LOS JAGUARES” et al., 2014).

Como se describe en el Plan Maestro Reserva Nacional Pacaya Samiria 2009 – 2013 (SERNANP, 2009), La Zona de Amortiguamiento de la RNPS tiene aproximadamente un buffer de 10 km adicionándose una extensión de 20 km en los alrededores de la bifurcación del río Ucayali que genera al canal de Puinahua, con el objetivo de prevenir actividades antropogénicas que pudieran afectar la calidad de las aguas. En la tabla 4 se muestra la zonificación de la RNPS estando clasificados por las zonas de protección estricta, silvestre, aprovechamiento, uso especial, recuperación y área de amortiguamiento.



Tabla 4. Zonificación de la Reserva Nacional Pacaya Samiria y usos permitidos

<b>Zonas</b>	<b>Objetivo de conservación</b>	<b>Usos permitidos</b>
Protección estricta	Mantener libres de la intervención humana ecosistemas representativos y recursos frágiles de la Reserva.	Excepcionalmente investigaciones científicas.
Silvestre	Promover el desarrollo de actividades de investigación, turismo y educación en áreas poco intervenidas, asegurando el mantenimiento de sus condiciones naturales.	Actividades de Investigación y educativas. Turismo sin infraestructura.
Aprovechamiento directo	Propiciar el uso sostenido de los recursos naturales de la Reserva, con fines de subsistencia y comercialización bajo planes de manejo con participación comunal.	Actividades de subsistencia. Pesca, caza y extracción de productos forestales no maderables, con fines comerciales, bajo Planes de Manejo. Actividades de Investigación y educativas. Turismo con infraestructura.
Uso especial	Regular y establecer los usos propios de los asentamientos humanos, de modo tal que sean compatibles con los objetivos de la Reserva.	Actividades agrícolas tradicionales que no afecten negativamente el área. Actividades de subsistencia. Pesca, caza y extracción de productos, forestales no maderables, con fines comerciales, bajo Planes de Manejo. Turismo con infraestructura. Agroforestería en purmas. Actividades de investigación y educativas.
Recuperación	Asegurar la recuperación de ambientes y recursos degradados a través de acciones de protección, repoblamiento, reforestación y manejo.	Manejo experimental de taricaya, arahuana y paiche. Manejo de bosques de colina (regeneración natural de caoba y cedro). Turismo sin infraestructura. Actividades de investigación y monitoreo. Explotación petrolera en la zona de la Batería 3.
Amortiguamiento	Minimizar el impacto dentro de la Reserva, de las actividades humanas realizadas fuera del área protegida.	Actividades que no pongan en peligro la conservación de la Reserva.

En el Plan Maestro Reserva Nacional Pacaya Samiria 2017 – 2021 (Galarza, E. 2017) se muestra la zonificación más actualizada recientemente como se muestra en la figura 36, donde las diversas zonas clasificadas han sido modificadas a comparación del plan maestro del 2009 - 2013 donde se tenía 32.31% como Zona Silvestre (S), 6.19% como Zona de Uso Especial (UE), 18.67% como Zona de Recuperación (REC) y 42.84% como Zona de Aprovechamiento Directo (AD), en la que se puede apreciar una gran variación en las zonas de aprovechamiento directo.

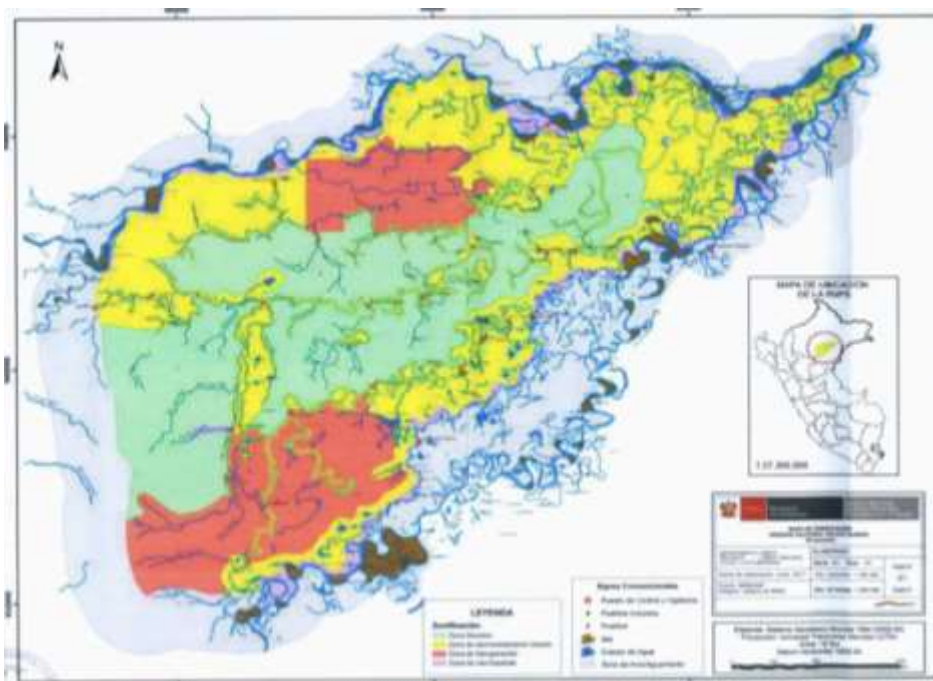


Figura 36. Cambio de la zonificación

Fuente: Plan Maestro del PNSD - Legislación, 2017

## 3.2. Materiales

### 3.2.1. Equipos

Laptop Intel(R) Core (™) i5-10300H CPU @ 2.50GHz (8PCUs).

### 3.2.2. Software y programas

HYPACK (Licencia), HEC-RAS 6.2 (Software Libre), Microsoft Office (Licencia de estudiante), AutoCAD 2020 (Licencia de estudiante), QGIS 3.16.16 (Software Libre).

### 3.2.3. Insumos

Batimetría del río Amazonas realizada por la Marina de Guerra del Perú en el 2014 y batimetría de los ríos Pacaya, Huallaga, Ucayali, Marañón y Tigres generados por el CITA-UTEC en las campañas 2018 y 2019.

Caudales registrados en los meses de mayo, setiembre y noviembre del 2019 por el CITA-UTEK.

Niveles de agua registrados por las estaciones hidrométricas de Contamana, Requena, San Regis, Nauta, Lagunas y San Lorenzo; y niveles de agua registrados con sensores de niveles a presión en los ríos Pacaya y Samiria por el CITA-UTEK. En la figura 37 se muestra los datos de entrada utilizados para desarrollar esta tesis.



Figura 37. Datos de entrada para realizar la simulación del modelo bidimensional

### 3.3. Criterios de investigación

#### 3.3.1. Nivel de investigación

El nivel de investigación es predictivo debido a que el modelo bidimensional está basado con información histórica (2018 – 2019) y fue utilizada para predecir los patrones de descarga de los flujos en la RNPS.

#### 3.3.2. Tipo de investigación

El tipo de investigación es aplicada debido a que se manipulan los indicadores de la variable X para conseguir la calibración del modelo bidimensional.

#### 3.3.3. Variables de investigación

Variable X: Modelo bidimensional.

Variable Y: Inundación fluvial.

#### 3.3.4. Operación de las variables

Tabla 5. Variables de entrada y salida del sistema integrado

VARIABLE	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIÓN	INDICADOR	UNIDAD DE MEDIDA	
<b>X:</b> Simulación del Modelo bidimensional	Dominio computacional y características hidráulicas	Geometría y áreas de refinamiento	Malla estructurada y no estructuradas	m	
		Corrección del DEM	Cauce de los ríos en formato ráster	m	
	Unificación del cauce de los ríos en el DEM		m		
	Condiciones de borde e iniciales de caudales	Hidrogramas de entrada	Caudales interpolados de la calibración Caudal-Nivel	m <sup>3</sup> /s	
		Condiciones de borde de entrada y salida	Condiciones de entrada para los ríos: Ucayali, Marañón, Huallaga, Tigres, Tapiche, Pacaya y Samiria	Coordenadas	
			Condiciones de salida para el río Amazonas	Coordenadas	
		Condiciones iniciales	Caudales mínimos constantes para cada condición de borde de entrada	m <sup>3</sup> /s	
		Coefficientes de manning iniciales	Coefficientes de rugosidad de los ríos y llanura de inundación	Adimensional	
	<b>Y:</b> Inundación fluvial	Simulación y calibración del modelo bidimensional	Solución numérica	Ecuación reducida para aguas poco profundas Onda difusiva	EDO - Adimensional
			Configuración de la simulación	Intervalo de inicio de simulación	min
Visualización de salida del mapeo				h	
Hidrogramas de salida				m <sup>3</sup> /s	
Intervalo de salida de simulación				h	
Estabilidad del modelo			Número de Courant-Friedrich-Lewy	Adimensional	
			Error numérico en el caudal calculado	%	
			Error numérico en la elevación de la superficie del agua calculada	%	
Llanura de inundación			Áreas de inundación	m/s	
Coefficientes de manning calibrados			Coefficientes de rugosidad de los ríos y llanura de inundación calibrados	Adimensional	

Elevación de la superficie del agua	Elevación	m
Tirante máximo	Profundidad	m

### 3.3.5. Diseño de investigación

El diseño de investigación es no experimental longitudinal del tipo tendencia, debido a que los indicadores de la variable X tienen una variabilidad espacio temporal y se utilizaron para analizar los cambios de la variable Y a través del tiempo.

### 3.3.6. Población y muestra

La población es la Reserva Nacional Pacaya Samiria y el área colindante dando así la delimitación del dominio computacional para simular el modelo bidimensional; y la muestra de datos son los registros de caudales, niveles de agua y batimetría en las condiciones de borde de entrada en el dominio computacional.

- **Ubicación en el espacio.** El presente estudio estuvo planificado para ser desarrollado en gabinete, donde se realizaron los distintos análisis y procesamiento de datos hidrodinámicos, hidráulicos y morfológicas de la Reserva Nacional Pacaya Samiria.
- **Ubicación en el tiempo.** El rango de temporalidad del modelo bidimensional corresponde a un año hidrológicos entre los años 2018 y 2019.

### 3.3.7. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La técnica empleada para el desarrollo de la investigación es la revisión de artículos científicos y/o documentos para parte de los antecedentes de la investigación que sirvió para realizar la metodología y análisis de variables; obtención de datos hidrométricos y meteorológicas de las estaciones Contamana, Requena, San Lorenzo, Lagunas, San Regis y Nauta del SENAMHI, delimitación del área de estudio con el programa QGIS 3.16.16; y técnicas de recolección de datos en campo como se muestra en la tabla 6.

Tabla 6. Métodos utilizados en la generación de los parámetros en campo

Parámetro	Método	Unidad
Caudal y velocidad	ADCP método Doppler	m <sup>3</sup> /s y m/s
Batimetría	ADCP y Hypack método Doppler	m
Nivel del agua	Diferencia de presiones	m

Los instrumentos de recolección de datos fueron las fichas técnicas de campo, programas para el levantamiento hidrográficos (Hypack) con equipo hidroacústicos avanzados para las mediciones de caudales, batimetría y velocidades de los ríos en estudio; programas para el procesamiento de datos batimétricos, caudales y velocidades (Hypack, WinRiver y VMT); Excel para el procesamiento de datos meteorológicos (precipitaciones), hidrométricos (niveles de agua) y para la calibración de la relación caudal – nivel; y el modelo digital usado (DEM) con una resolución de 12.5 x 12.5 con una ondulación geoidal EGM96 como base del modelamiento, dimensión del modelo (2D), esquema numérico (Onda difusiva, tipo de malla (estructurada y no estructurada), tabla de coeficientes de manning según la naturaleza del lecho y finalmente la estabilidad y calibración del modelo.

- **Criterios de inclusión.** Se incluirán en el estudio:
  - Datos de campo generados por el CITA-UTEC en los ríos Pacaya, Huallaga, Marañón, Ucayali y Amazonas, y datos generados por la Marina de Guerra del Perú en la confluencia del río Amazonas.
- **Criterios de exclusión.** Se excluirán del estudio:
  - Datos de caudales con un error mayor al 15% del promedio.

### 3.3.8. Análisis de datos

El análisis empleó la estadística descriptiva que se empleó en el análisis de datos. Se usó el software Microsoft Excel para procesar los cálculos de los parámetros considerados y obtener las gráficas para la calibración del caudal – nivel y del modelo, facilitando el análisis y conclusiones.

## 3.4. Metodología

La metodología consistió en caracterizar la conectividad hidrodinámica de los ríos Huallaga, Marañón y Ucayali en la RNPS en el año hidrológico 2018 - 2019 para describir los procesos de inundación por medio de un modelo bidimensional (figura 38). Para la caracterización física del área de investigación, se usaron mapas temáticos del IGEMMENT y del MINAM con datos de cobertura vegetal, geomorfología, zonas de vida, geología, uso y tipo de suelo y topografía de la RNPS. Con respecto a la obtención de parámetros hidrológicos e hidráulicos se utilizaron datos de precipitación y nivel de agua de las estaciones del SENAMHI; y datos de caudales y batimetría generados por el CITA-UTEC en las campañas del 2018 y 2019 registrados en la Reserva y su área de amortiguamiento.

Para el modelo del terreno se acopló la batimetría de los ríos con el DEM (Pérez, J. et al., 2018) descargado del proyecto ALOS PALSAR con una resolución de 12.5 m x 12.5 m procesado con una ondulación geoidal EGM96.

Para las condiciones de entrada se utilizarán los caudales interpolados de las campañas del 2018 y 2019 del proyecto MOORE ejecutadas por el CITA-UTEC y para las condiciones de salida se interpolaron los niveles de agua de la estación Nauta, transformando los tirantes a elevaciones (m) en el río Amazonas.

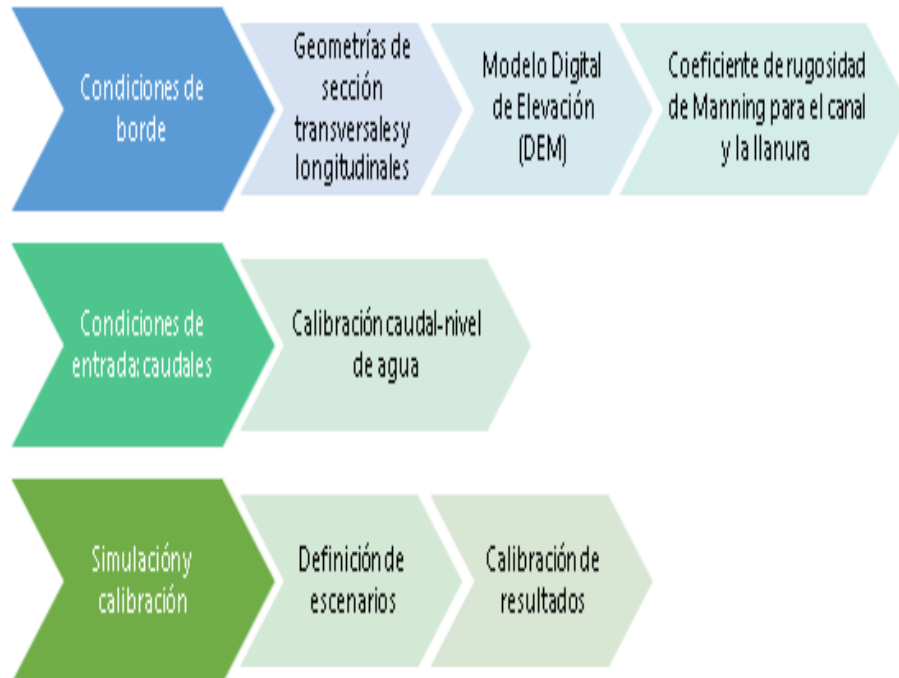


Figura 38. Flujograma para el modelamiento bidimensional

Fuente: CITA-UTEC, 2021

### 3.4.1. Dominio computacional y características hidráulicas de los ríos

Se usó el programa HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System) para realizar el modelo bidimensional integrando las herramientas de análisis hidráulico para flujos no permanente. Para la delimitación del dominio computacional se tuvo en cuenta las extensiones de la RNPS y su área de amortiguamiento incorporando las características geomorfológicas de los ríos Huallaga, Marañón y Ucayali a nivel de planta.

La geometría estuvo basada en una combinación de mallas estructuradas y no estructuradas en todo el dominio de 400x400m, se crearon áreas de refinamiento de 80 m x 80 m para los ríos Huallaga, Tapiche, Tigres, Ucayali y marañón; y áreas de 25 m x 25 m para los ríos Pacaya y Samiria.

El coeficiente de Manning para la llanura de inundación fue de 0.2 y para los ríos de 0.035 haciendo referencia a la tabla de Ven Te Chow (1994) para ríos con fondo móvil y arenosos que abarca un rango entre 0.025 a 0.035 como se muestra en la figura 39.

D. CORRIENTES NATURALES	D.1. CORRIENTES MENORES (ANCHO SUPERF. < 30 m)	a. Ríos en planicies rectos, sin zonas muertas	0.025	0.030	0.033
		rectos sin zonas muertas con piedras y malezas	0.030	0.036	0.040
		Sinuoso, vegetación y piedras pedregoso	0.035	0.045	0.050
		Abundante vegetación, sinuoso.	0.045	0.050	0.060
		0.075	0.100	0.150	
		b. Torrentes de montaña, sin vegetación, bordes abruptos.	0.030	0.040	0.050
	Árboles y arbustos sumergidos	0.040	0.050	0.070	
	Parcialmente en crecidas con piedras y Pocas rocas grandes rocas y piedras en el fondo.				
	D.2 PLANICIES DE INUNDACION	a. con pasto sin arbusto	0.025	0.030	0.035
		pastizales bajos	0.030	0.035	0.050
pastizales altos		0.020	0.030	0.040	
b. áreas cultivadas sin cultivo		0.030	0.040	0.050	
con cultivos					
c. Arbustos y Malezas escasos		0.040	0.060	0.080	
densos		0.070	0.100	0.160	
d. Árboles sauces	0.110	0.150	0.200		
tierra despejada con troncos	0.030	0.040	0.050		
D3 Ríos Principales (ancho superior a 30 m)	Secciones Regulares	0.025	-	0.060	
	Secciones Irregulares	0.035	-	0.100	

Figura 39. Coeficientes de Manning para ríos y planicie de inundación

Fuente: Hidráulica de Canales Abiertos, Ven Te Chow, 1994

Se utilizaron las secciones transversales de los ríos Huallaga, Maraón, Ucayali, Tigres, Pacaya y Samiria registrados por el equipo ADCP y Monohaz en las campañas del 2018 y 2019, con la finalidad de configurar la geometría del cauce de los ríos dentro del Modelo Digital de Elevación (DEM, por sus siglas en inglés) del satélite ALOS PALSAR con una resolución de 12.5 m x 12.5 m como se muestra en la figura 40.

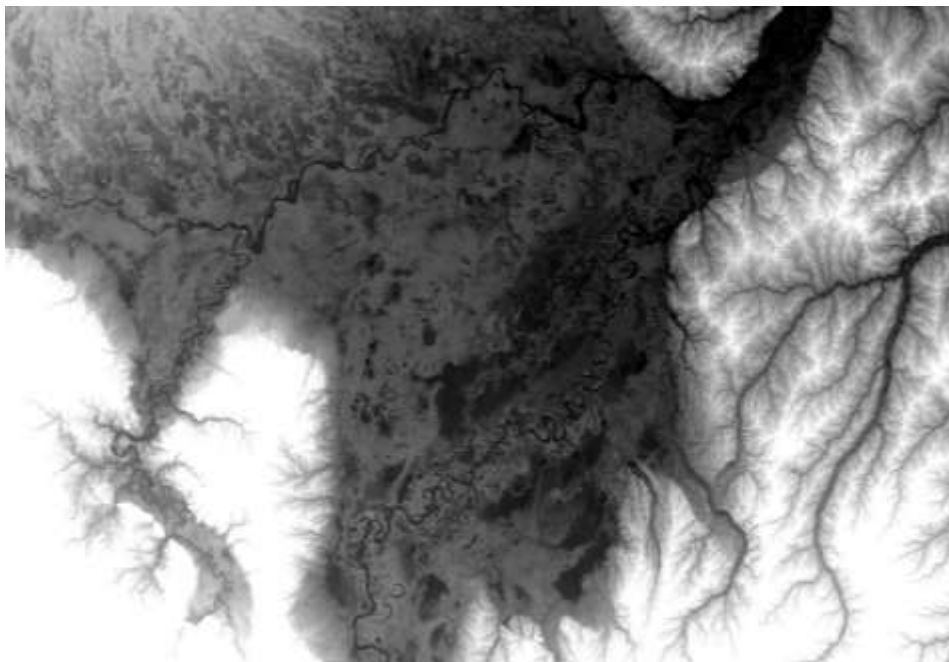


Figura 40. DEM en la Reserva Nacional Pacaya Samiria en el programa QGIS 3.16.16



En la figura 41 se muestran los datos de batimetría e hidrodinámicos recopilados en las campañas del CITA-UTEC de los años 2018 y 2019 en la Reserva Nacional Pacaya Samiria y batimetría en el río Amazonas por parte de la Marina de Guerra del Perú siendo procesados con el software HYPACK, que está basado en Windows para la industria hidrográfica y de dragado (HYPACK, 2020) los datos batimétricos y WinRiver los datos de caudales con flujos secundarios y batimetría registrados por el equipo ADCP.

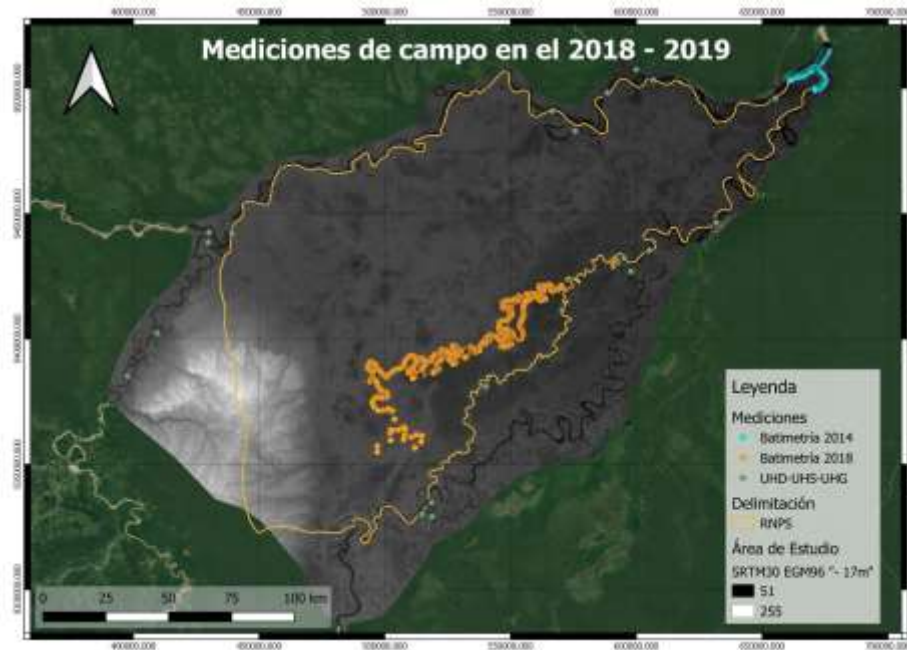


Figura 41. Mediciones de datos batimétricos e hidrodinámicos en campañas del 2014, 2018 y 2019

El procesamiento de datos batimétricos se realizó con el programa HyPack como se muestra en la figura 42.

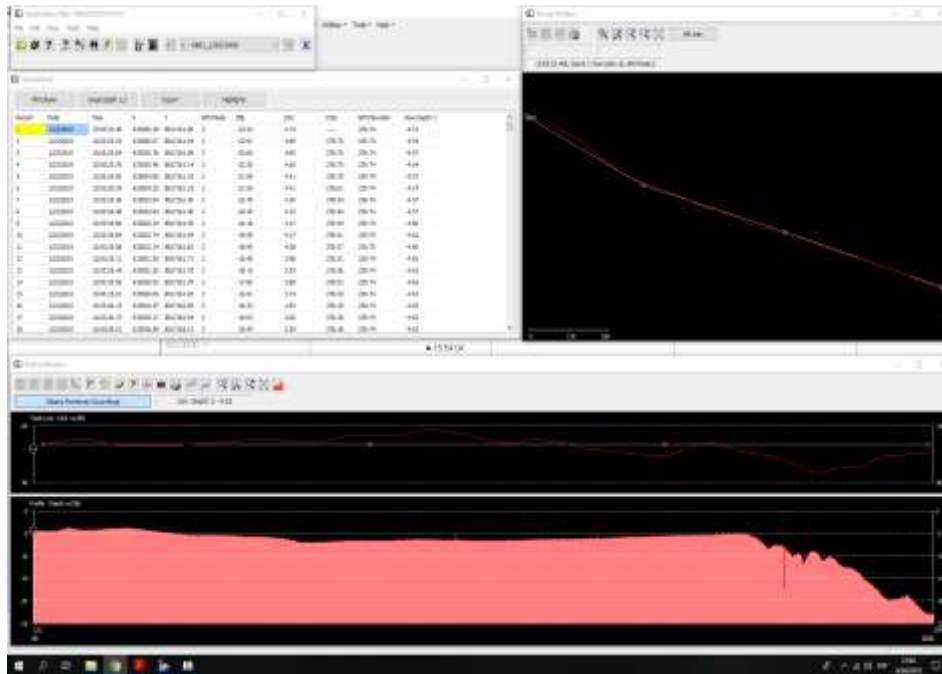


Figura 42. Filtraciones de datos de batimetría en HyPack

Fuente: Extraído de las presentaciones del CITA-Utec, 2021

#### - Ciclo hidrológico

Los datos de precipitaciones diarias fueron utilizados para determinar los ciclos hidrológicos (creciente y vaciante) para los ríos Huallaga, Marañón, Tigre, Tapiche y Ucayali (figura 43) en el año hidrológico 2018 – 2019. Estos ciclos nos permitieron establecer las condiciones iniciales de caudales en el modelo bidimensional.

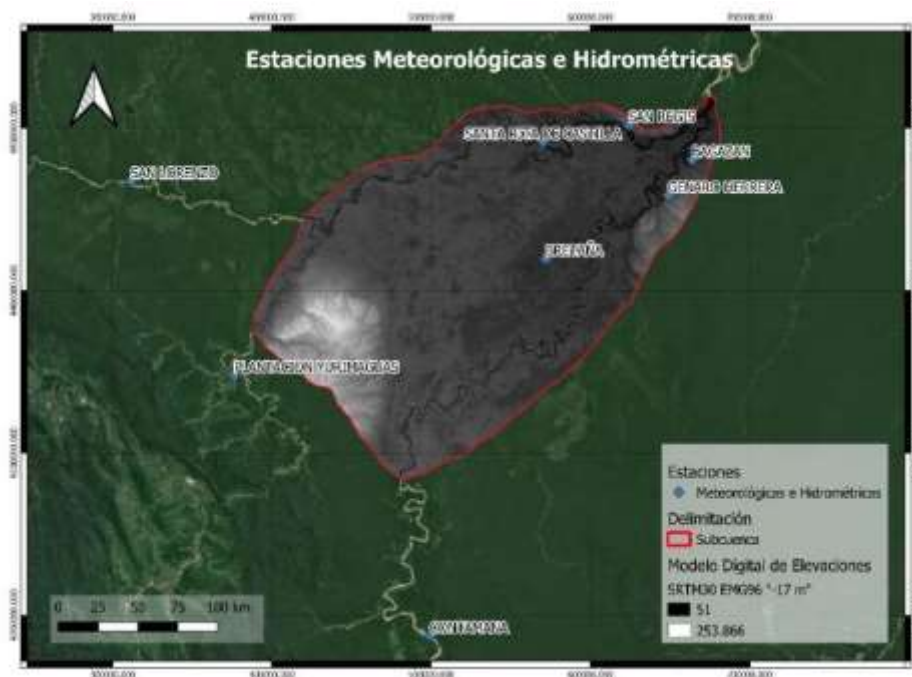


Figura 43. Estaciones meteorológicas para determinar las condiciones iniciales

#### - Niveles de agua

Los niveles de agua se extrajeron de las estaciones hidrométricas de Contamana para el río Ucayali; San Lorenzo y San Regis para el río Marañón; Lagunas para el río Huallaga; y Requena para el río Tapiche como se muestra en la tabla 7.

Tabla 7. Estaciones hidrométricas usadas para registrar los niveles del agua para cada río

Ríos/Estaciones	Contamana	Lagunas	San Lorenzo	San Regis	Requena
Huallaga		X			
Ucayali	X				X
Marañón			X	X	

Se usaron los promedios mensuales de los niveles de agua registrados a las 6 horas para mantener una homogeneidad con todas las estaciones. Los niveles de agua registrados en el 2019 se utilizaron para calibrar los caudales registrados en las campañas del 2019 y obtener la relación de caudales - niveles.

#### - **Caudales**

Los caudales se obtuvieron de las campañas en el 2019 registrados con el ADCP, que fueron utilizados para realizar la curva de calibración caudal-nivel con niveles de agua extraídos de las estaciones hidrométricas del SENAMHI.

#### **3.4.2. Condiciones de borde e iniciales de caudales**

Las condiciones de borde en el dominio computacional se establecieron 5 condiciones de entrada con hidrogramas de caudales y 1 de salida con una pendiente normal como se muestran en la figura 44 elaborado por el CITA-UTEC.

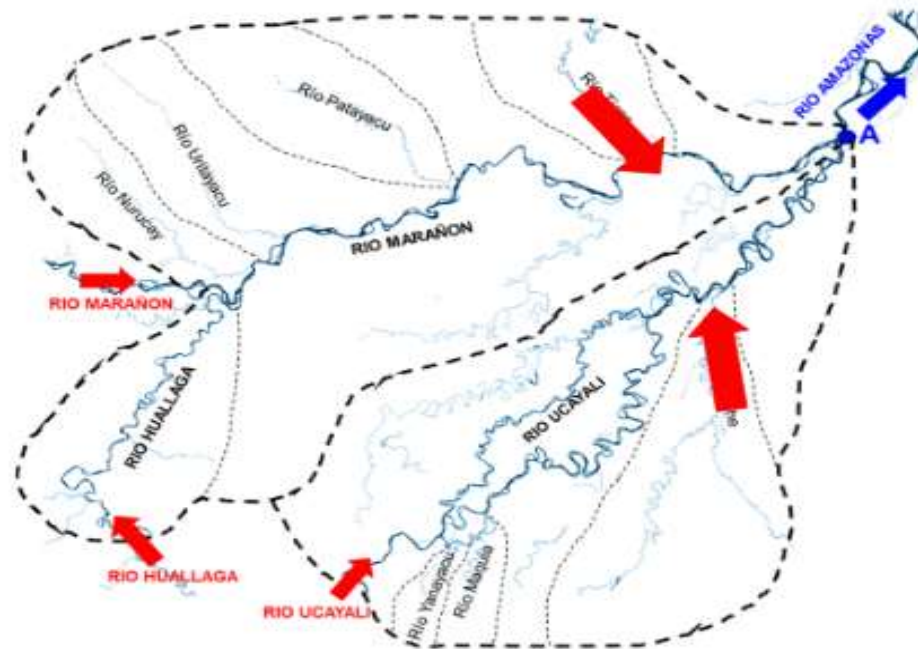


Figura 44. Condiciones de borde según el modelo conceptual de la conectividad de flujos

Fuente: CITA-UTEC, 2021

#### - Curva de calibración caudales - nivel

La curva de calibración de Caudal - Nivel se realizó con la ecuación de Manning (Ecuación 16) para obtener los hidrogramas de caudales interpolados en el año hidrológicos 2018 – 2019 (figura 45).

$$A * R^{2/3}_{calculado} = Q_{registrado} * n / S^{1/2} \quad (16)$$

En donde A es el área de la sección transversal ( $m^2$ ) de las mediciones de ADCP, n es el coeficiente de Manning (Chow, 1994), R es el radio hidráulico (m) y S es la pendiente del cauce (m/m).

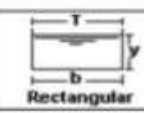


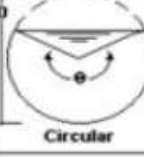

Sección	Área hidráulica A	Perímetro mojado P	Radio hidráulico R	Espejo de agua T
 Rectangular	$by$	$b+2y$	$\frac{by}{b+2y}$	$b$
 Trapezoidal	$(b+zy)y$	$b+2y\sqrt{1+z^2}$	$\frac{(b+zy)y}{b+2y\sqrt{1+z^2}}$	$b+2zy$
 Triangular	$zy^2$	$2y\sqrt{1+z^2}$	$\frac{zy}{2\sqrt{1+z^2}}$	$2zy$
 Circular	$\frac{(\theta-\text{sen}\theta)D^2}{8}$	$\frac{\theta D}{2}$	$(1-\frac{\text{sen}\theta}{\theta})\frac{D}{4}$	$(\frac{\text{sen}\theta}{2})D$ ó $2\sqrt{y(D-y)}$
 Parabólica	$\frac{2}{3}Ty$	$T+\frac{8y^2}{3T}$	$\frac{2T^2y}{3T+8y^2}$	$\frac{3A}{2y}$

Figura 45. Configuración de los cauces de los ríos según su geometría

Fuente: Ven Te Chow, 1994

Los variables necesarias para desarrollar la curva de calibración fueron extraídos de los datos procesados del ADCP, donde se usó la batimetría, área y radio hidráulico de la sección transversal (Hernandez, N., 2016), en la figura 46 se muestra la calibración caudal - nivel para el río Tapiche, en donde en el eje “x” representa a los caudales y en el eje “y” a los niveles relativos del agua en la estación hidrométrica de Requena.

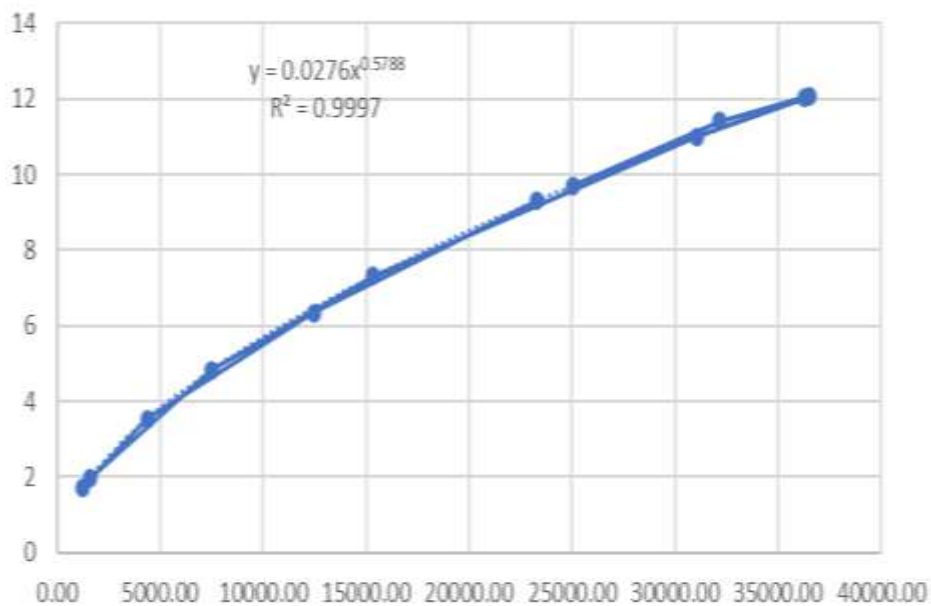


Figura 46. Interpolación de caudales usando la ecuación de Manning para el río Tapiche

En la figura 47 se muestra la introducción del hidrograma para el año hidrológico 2018-2019 en el programa HEC-RAS 6.2.

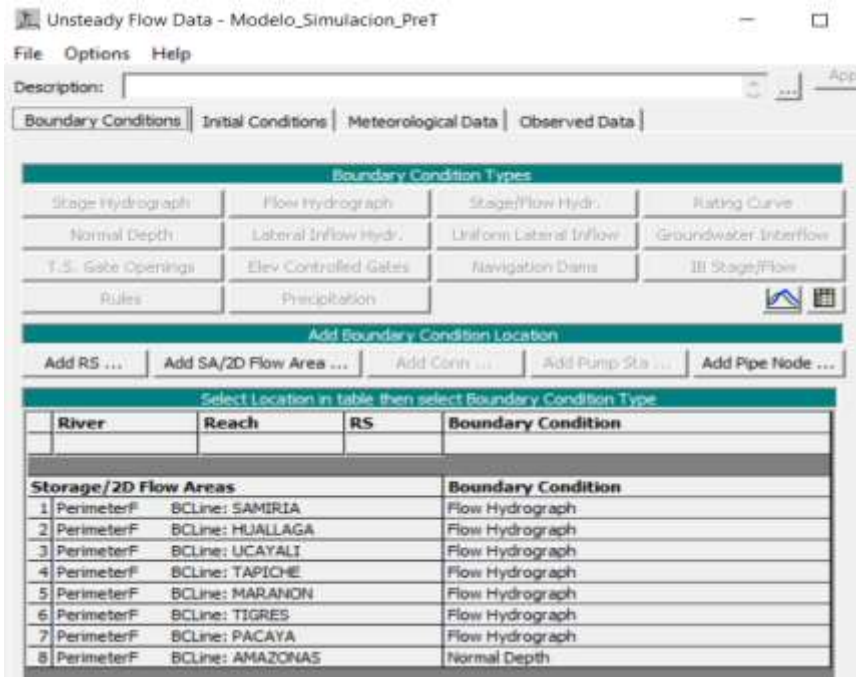


Figura 47. Hidrogramas de entrada para un régimen de flujo no permanente

### 3.4.3. Calibración del modelo bidimensional

Se realizaron varias simulaciones de régimen de flujo no permanente para determinar la calibración de los ríos Marañón, Ucayali y del modelo bidimensional. Se desarrolló un modelo hidrodinámico bidimensional para comprender y cuantificar el proceso de inundación en la RNPS, teniendo en cuenta como condiciones de borde en los ríos Huallaga, Marañón, Ucayali, Pacaya y Samiria hidrogramas de caudales interpolados del año hidrológico 2018-2019. Se usó el solver de “Diffuse Wave” (Onda difusiva) debido a que a la escala de la zona de estudio es a nivel regional; en la cual, se desprecian los modelos de turbulencia y efecto Coriolis, otro motivo por la elección del solver fue porque la RNPS tiene una pendiente plana o llana y no cuenta con estructuras hidráulicas de gran envergadura en el cauce de los ríos Huallaga, Marañón y Ucayali. La calibración de un modelo de volúmenes finitos (modelo matemático de HEC-RAS) es un proceso cuyo objetivo es afinar el modelo matemático del proceso de inundación en el programa HEC-RAS que refleje el comportamiento del proceso de inundación observado y los parámetros de calibración fueron los coeficientes de Manning de los ríos Marañón y Ucayali para determinar las elevaciones de los niveles del río.

#### - Calibración y estabilidad de la simulación de inundaciones

La calibración del modelo bidimensional se realizó con la comparación de las elevaciones máximas del nivel de agua resultado de la simulación con las elevaciones máximas del nivel de agua registrados en las estaciones hidrométricas de San Regis y Requena, en los

ríos Marañón y Ucayali respectivamente para el año hidrológico 2018 - 2019. En la figura 48 se muestra un ejemplo del ciclo hidrológico de los ríos amazónicos.

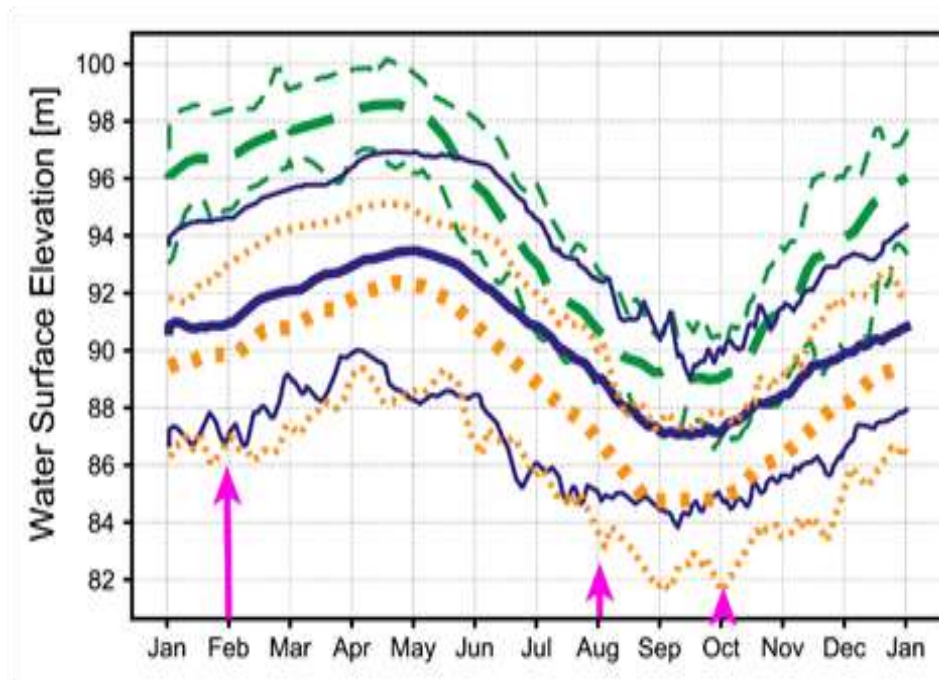


Figura 48. Diagramas de elevación del nivel del agua

Fuente: SENAMHI

Esta calibración se realizó con la modificación de los coeficientes de manning ( $n$ ) de los cauces de los ríos Marañón y Ucayali. A mayor “ $n$ ” se tendrá mayores niveles del río en las estaciones de comparación, debido a que la rugosidad del fondo de los ríos aumenta haciendo referencia a la presencia de grandes dunas.

Ya calibrado el modelo se elaboraron mapas de máximas avenidas y áreas de inundación (profundidad) que se contrastaron con los resultados de Reis et al., (2018) y del trabajo elaborado por el CITA-UTEC en el 2020.

#### - **Rutas de descargas y conectividad lateral**

Las rutas de descargas hacen referencia a las cochas y paleocauces presentes dentro de la RNPS inundadas de forma permanente o semipermanentes durante el año hidrológico 2018-2019 y la conectividad lateral hace referencia a la influencia de los ríos Marañón y Ucayali en base a la captura, intercambio y retención del agua y el sedimento hacia la RNPS.

Para determinar el caudal de salida se exporto usando el comando “Plot Times Series” del programa HEC-RAS 6.2 como se muestra en la figura 49.

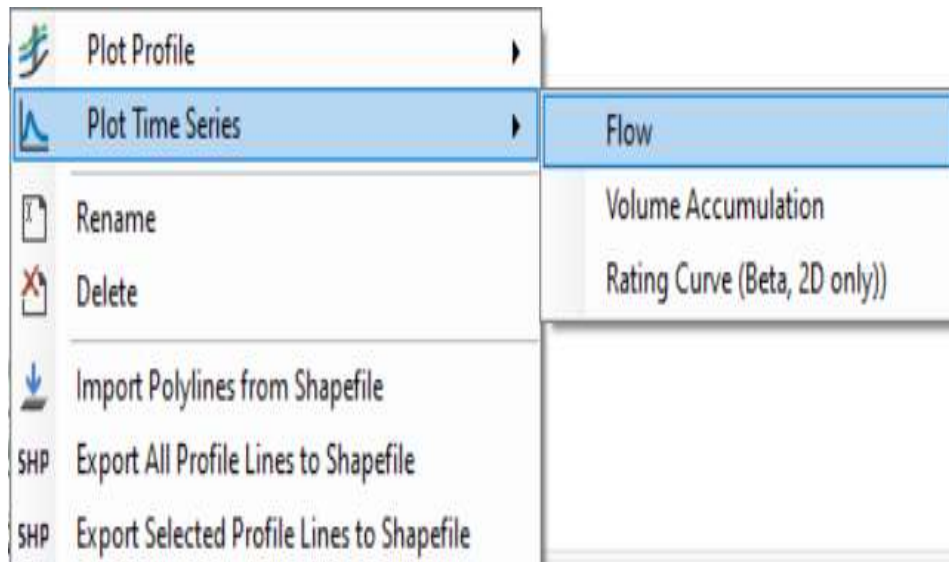


Figura 49. Exportación de caudales de salida en HEC-RAS 6.2

Para determinar las áreas de extensión de inundación se exporto usando el comando “Plot Profile” del programa HEC-RAS 6.2 como se muestra en la figura 50.

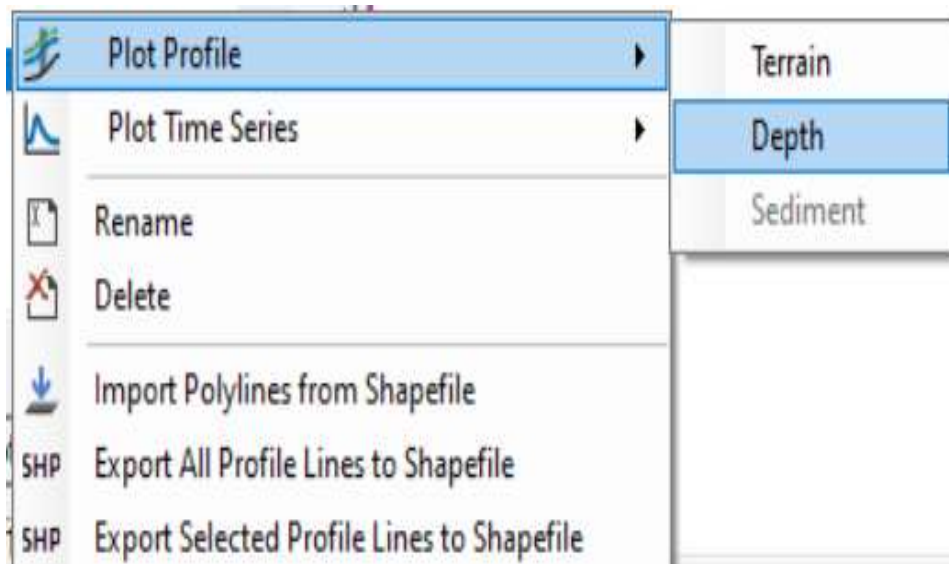


Figura 50. Exportación de áreas de inundación de salida en HEC-RAS 6.2

#### - **Flora y fauna en la Reserva Nacional Pacaya Samiria**

Las especies de flora y fauna en la RNPS dependen mucho de los humedales que este presenta, como las especies migratorias como las aves, especies amenazadas y especies endémicas que son acobijadas y protegidas en estas mismas. Una de las funciones de estos grandes humedales es en el control de las inundaciones, actuando como esponjas absorbiendo el agua de las lluvias y de las crecientes de los ríos Huallaga, Marañón y Ucayali, que a su vez se infiltra lentamente a través del suelo y de la vegetación. También se desempeñan como importantes sumideros de carbono cumpliendo un rol fundamental en la adaptación al cambio



climático, amortiguando el efecto de las tormentas e inundaciones; y como filtrador de sustancias tóxicas en los cuerpos de agua.

Para determinar el impacto de la inundación fluvial con la diversidad de flora y fauna se acoplaron los resultados del modelamiento bidimensional con la cobertura vegetal y geomorfología de la zona de estudio; y se analizaron las conectividades hidrodinámicas hacia la Reserva en la zona de mayor productividad pesquera en el transcurso del año hidrológico 2018-2019. La exportación de las extensiones de inundación de la simulación calibrada se muestra en la figura 51.

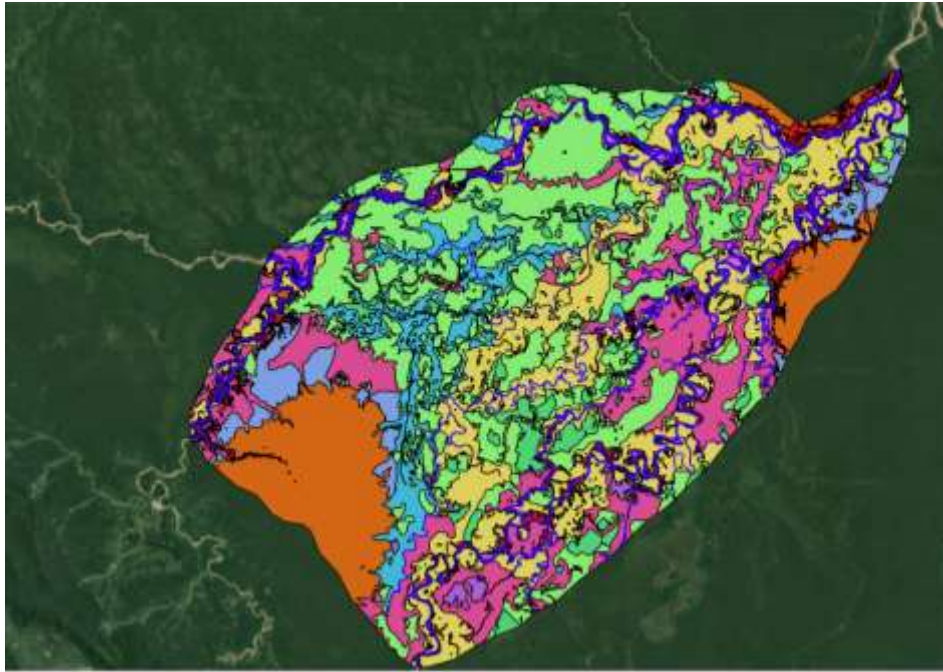


Figura 51. Traslape de cobertura vegetal y geomorfología con las áreas de inundación en QGIS 3.16.16

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

### 4.1. Dominio computacional y características hidráulicas de los ríos

El CITA-UTEC realizó el estudio de caracterización fluvial de la RNPS, a partir de lo cual se determinó la extensión espacial del área de la llanura de inundación de la reserva y la delimitación del dominio computacional. Se determinó el ciclo de las inundaciones y su distribución espacial en el área de la llanura de inundación de la reserva. Se emplearon datos meteorológicos, climáticos e hidrológicos de la base de datos libre del SENAMHI, los cuales pasaron por los procesos de completación y análisis de datos para poder obtener los datos visuales y cuantificables de los regímenes hidrológicos en la RNPS (figura 52).

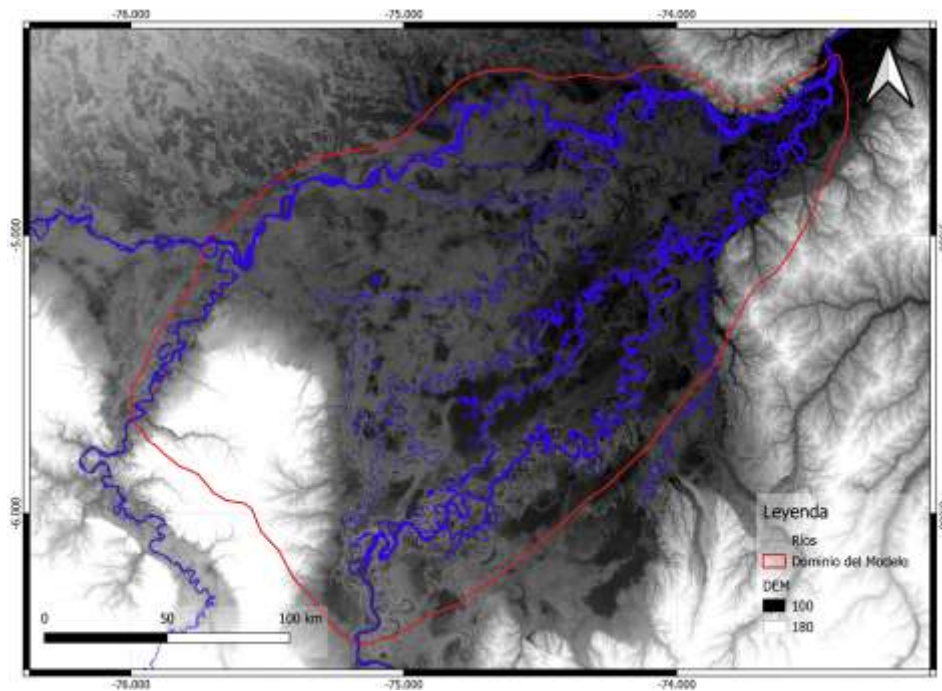


Figura 52. Dominio del modelo bidimensional de 34754.704 km<sup>2</sup> con 322782 celdas

El área del dominio computacional es de 34754.704 km<sup>2</sup> con un perímetro de 829.398 km conteniendo 322782 celdas con un conjunto máximo de 125577 en un área máxima de 4338197.70 m<sup>2</sup>, mínimo de 2458.15 m<sup>2</sup> y un promedio de 119526.50 m<sup>2</sup> y para las áreas de refinamiento que abarca los ríos Huallaga, Marañón, Ucayali, Tigres, Tapiche, Pacaya y Samiria cuenta con un área total de 2158.71 m<sup>2</sup> y un perímetro de 4132.50 km. También, se crearon “Breaklines” para diferenciar el cauce de la llanura de inundación en el dominio, contando con un perímetro total de 3057.30 km (Figura 53).

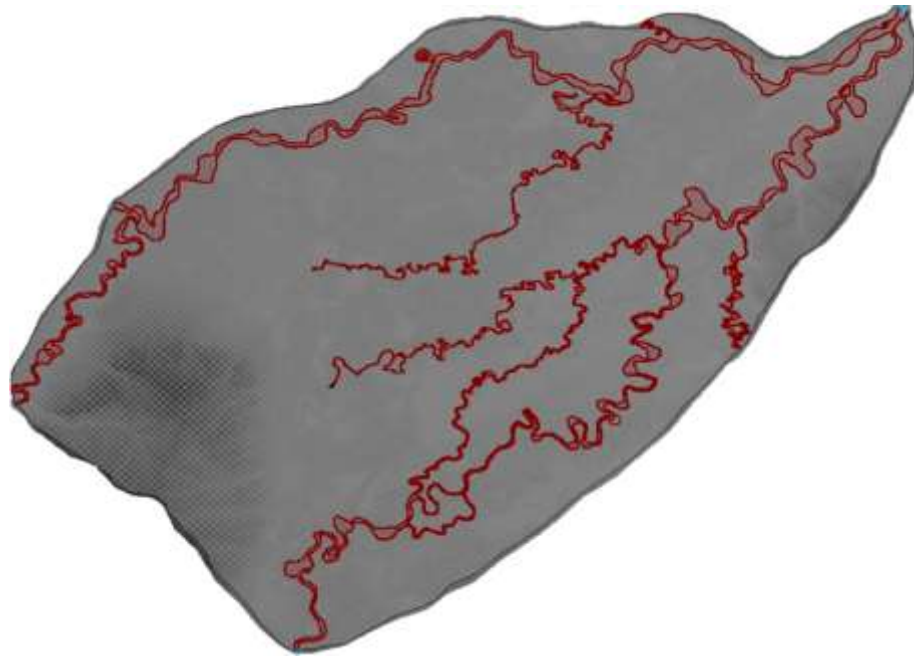


Figura 53. Área de refinamiento total de 2158.71 m<sup>2</sup>, 400x400 la llanura de inundación, 80x80 ríos grandes y 25x25 ríos pequeños

Con respecto a la batimetría, se trabajó con datos de los años 2014, 2018 y 2019 para interpolar la batimetría de los ríos Ucayali, Huallaga y Marañón en toda el dominio del modelo (figura 54 y figura 55), estos datos registrados por el ADCP fueron procesados con el programa WinRiver y VTM como parte de una extensión de MATLAB sin necesidad de contar con licencia de esta misma. Estas secciones transversales también fueron empleados para la curva de calibración Caudal - Nivel.

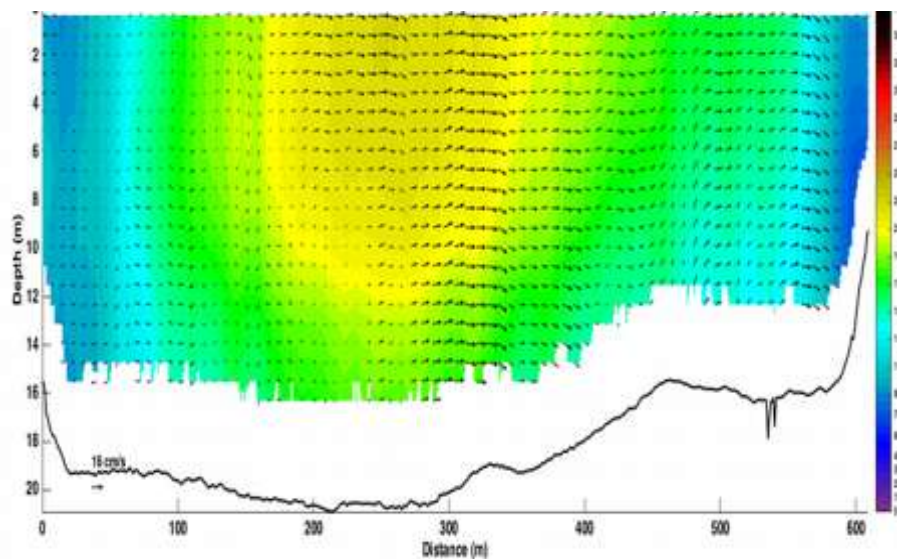


Figura 54. Magnitud de velocidad con la distribución del flujo secundario (cm/s) en la sección transversal del río Marañón, registrada el 18/01/19

Fuente: CITA-UTEC, 2019

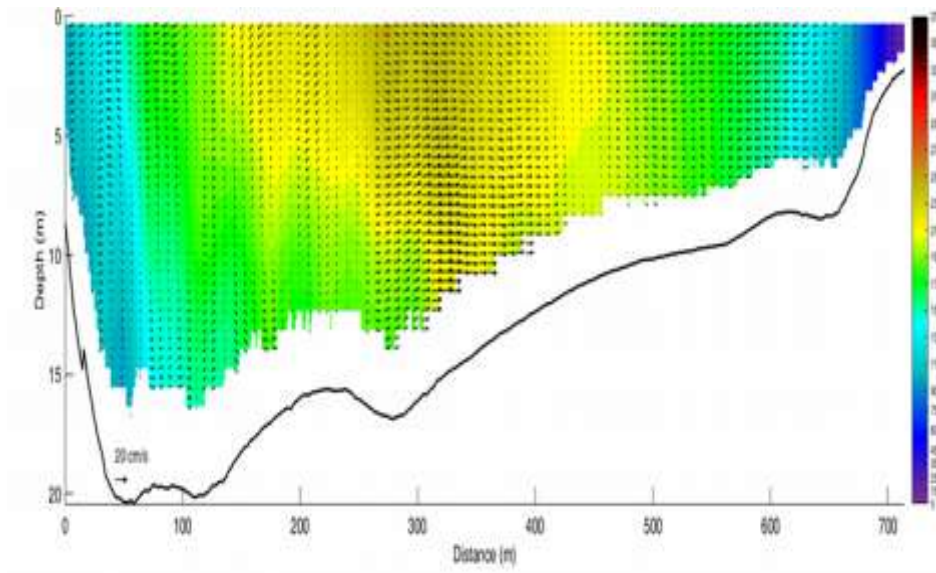


Figura 55. Magnitud de velocidad con la distribución del flujo secundario (cm/s) en la sección transversal del río Ucayali registrada el 20/02/19

Fuente: CITA-UTEC, 2019

La figura 56 muestra los datos mensuales de nivel de agua obtenidas de las estaciones localizadas dentro y fuera de la zona de estudio. Se puede observar la falta de datos disponibles en algunas estaciones para ciertos años, para lo cual se empleó la metodología de análisis y completación de datos por medio del método CUTOFF.

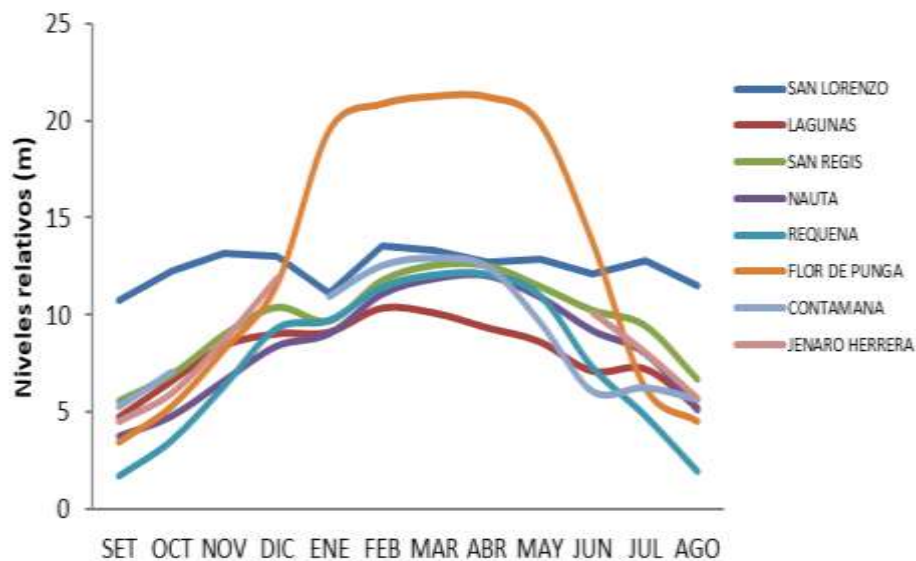


Figura 56. Datos de nivel de agua obtenidos de estaciones del SENAMHI

También se emplearon datos de caudales ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) de las estaciones de San Regis y Requena, ya que registraban más cantidad de datos mensuales desde 1995 al 2012; con la cual,

sirvió para conocer la tendencia de las temporadas altas y bajas y su relación con las precipitaciones aguas arriba y dentro de la RNPS (figura 57).

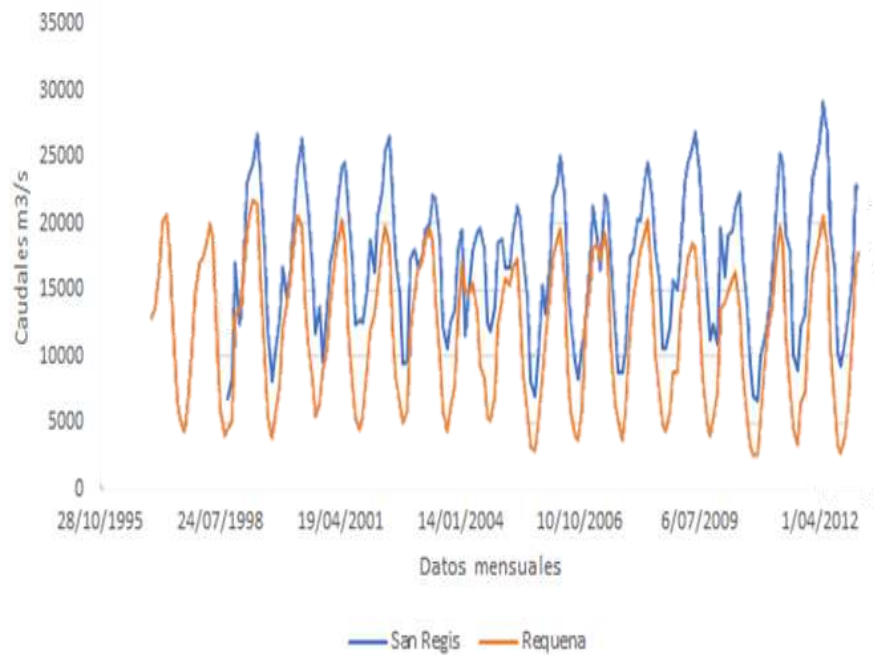


Figura 57. Caudales de las estaciones San Regis para el río marañón y Requena para el río Ucayali

#### 4.2. Condiciones de borde e iniciales de caudales

En la figura 58 se muestran las ubicaciones de las condiciones de borde de entrada con variación temporal correspondientes al año hidrológico entre 2018 y 2019 para los ríos Huallaga, Marañón, Ucayali, Pacaya, Samiria, Tigres y Tapiche.

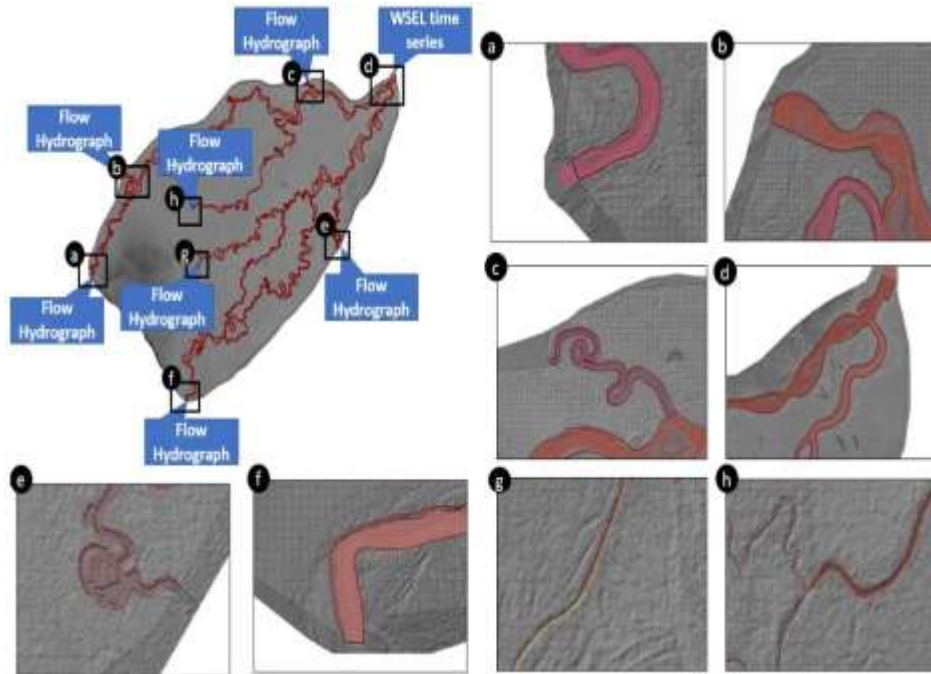


Figura 58. Condiciones de borde para el modelo bidimensional, a) Río Huallaga, b) Río Marañón, c) Río Tigres, d) confluencia con el Río Amazonas, e) Río Tapiche, f) Río Ucayali, g) Río Pacaya h) Río Samiria

Para la calibración la curva caudal - nivel como condiciones de borde de entrada de caudales para el modelo, se utilizaron tanto los caudales como las secciones transversales medidos por el ADCP en las campañas del CITA-UTEC en el año 2019. Los niveles de agua del año 2019 registrados por las estaciones hidrométricas, se utilizaron para calibrar con los caudales medidos y así obtener la curva de calibración caudal (medición)-nivel (SENAMHI). Además de los caudales registrados, también se usaron las velocidades y profundidades promedio; y batimetría. Los resultados de la calibración de Caudal – Nivel se muestra en la figura 59, obteniéndose la interpolación de caudales para los ríos Ucayali, Marañón, Huallaga, Tigres, Pacaya, Samiria y Tapiche.

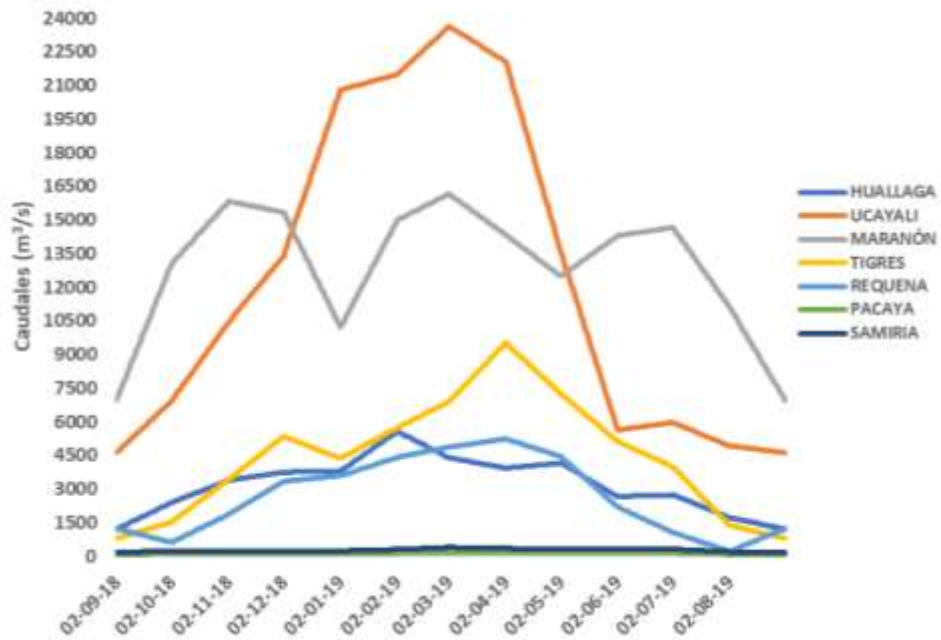


Figura 59. Interpolación de caudales con la curva de calibración curva – nivel

En la figura 60 se muestra la simulación de las condiciones iniciales a base de la recarga del río Amazonas hasta llegar a una elevación constante, este dato nos garantizó que los cauces de todos los ríos estudiados en el modelo fueron llenados. La exportación de estos resultados (.rst) fueron utilizados en la ventana “Unsteady Flow Data” del programa HEC-RAS 6.2 como condiciones iniciales.

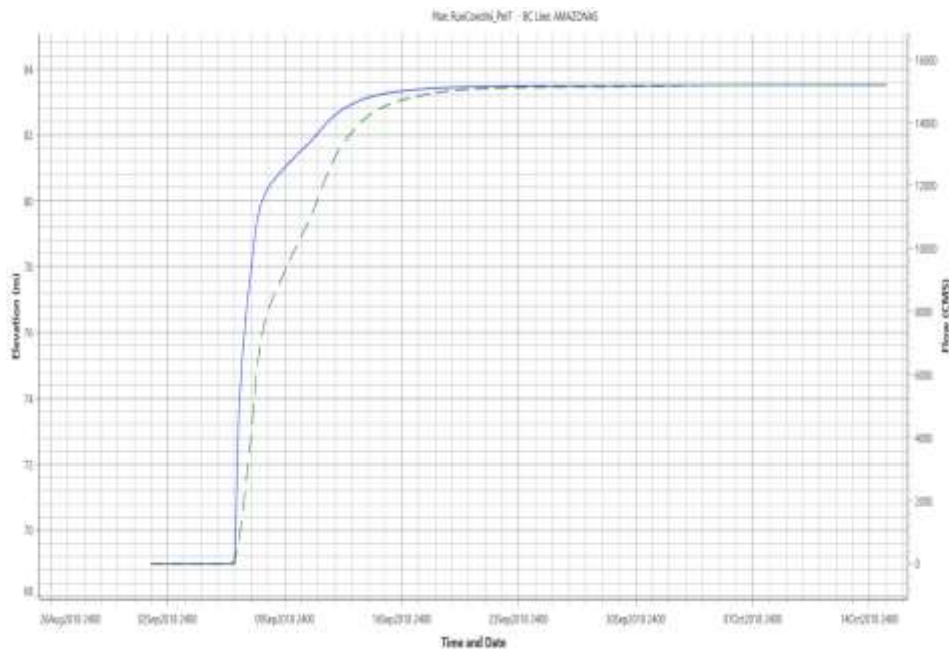


Figura 60. Condiciones iniciales con caudales mínimos en el río Amazonas

### 4.3. Calibración del modelo bidimensional

Se define a la llanura de inundación desde el área de geomorfología como un terreno con composición de material depositado no consolidado, proveniente del transporte de sedimentos de los ríos, además el comportamiento hidrológico del terreno conlleva a inundaciones temporales y cíclicas (Schmudde, 1968). En conclusión, podemos definir a la llanura de inundación como un espacio de terreno principalmente plano, ubicado al costado de un río y que está sujeto a inundaciones durante la temporada de crecidas (Leopold et al., 1964).

La calibración de los ríos estudiados, Ucayali y Marañón, para la obtención del coeficiente de Manning para cada río, se logró por medio de la comparación de los niveles de agua de la simulación con los niveles de agua transformados a elevaciones con la ondulación geoidal EGM96 de las estaciones del SENAMHI. La figura 61 muestra la calibración para el río Marañón para la fecha del 15 de enero para caudales máximos como condición de borde de entrada en el dominio computacional, obteniéndose un valor de 101.96 m de los 101.973 m medidos y la figura 62 muestra la calibración para el río Ucayali alcanzando un valor de 106.341 m de los 106.718 m medidos.

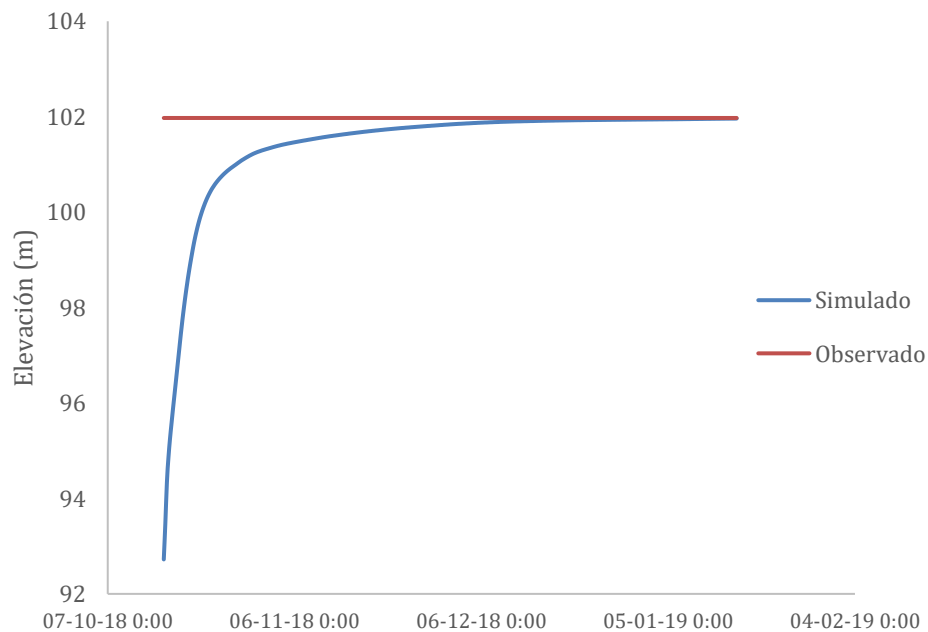


Figura 61. Calibración de tirantes máximos del río marañón para el 15 de enero del 2019



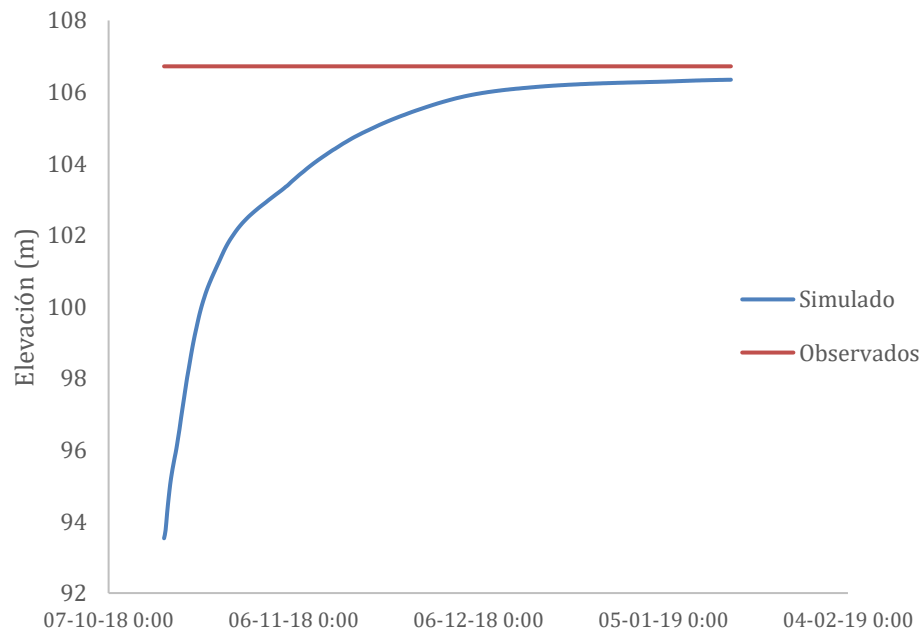


Figura 62. Calibración de tirantes máximos del río ucayali para el 15 de enero del 2019

Los niveles de agua registrados para el año hidrológico 2018-2019 con los niveles de agua del modelo bidimensional calibrados para los ríos Marañón y Ucayali, se muestra el mismo ciclo y tendencia de los ciclos de crecidas, vaciantes y transición de estos ríos. En la figura 63 muestra la calibración del ciclo hidrológico e hidrodinámico del rio Marañón en la Reserva y en la figura 64 la calibración del ciclo hidrológico e hidrodinámico del rio Ucayali en la Reserva.

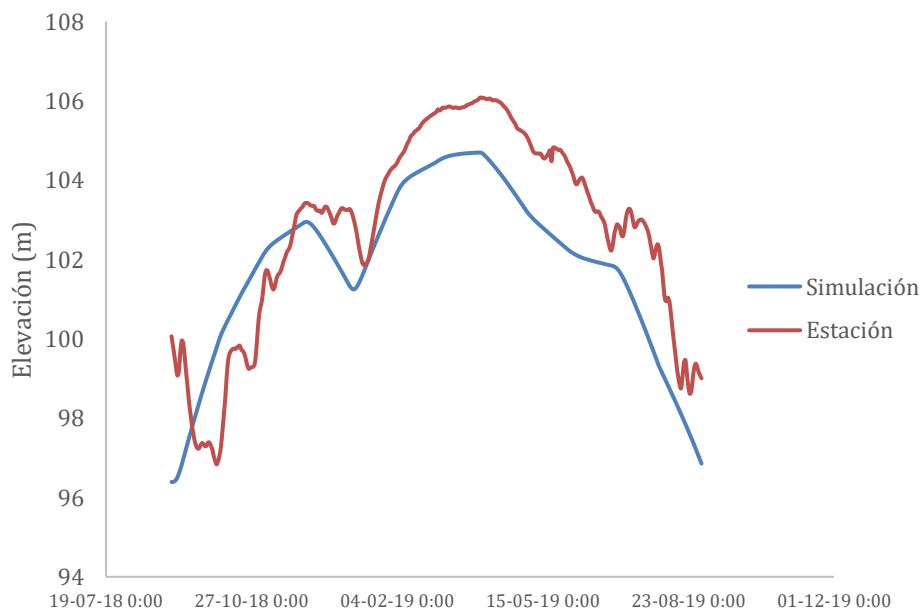


Figura 63. Calibración del ciclo hidrodinámico del río marañón en el año hidrológico 2018 – 2019

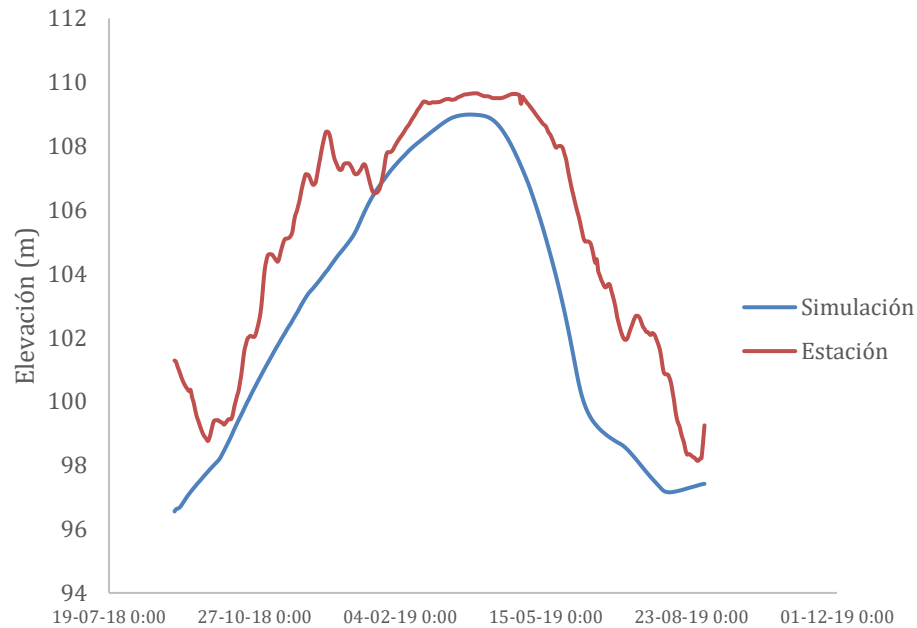


Figura 64. Calibración del ciclo hidrodinámico del río ucayali en el año hidrológico 2018 – 2019

En la tabla 8 se muestra la cantidad de iteraciones y la descripción de cada simulación para determinar la calibración del modelo, en donde se escogió el que tenía mayor coherencia con las rugosidades planteadas por Ven Te Chow, et al. (1994). se escogió la segunda iteración con los valores de 0.04 para el río Marañón y Ucayali, esta calibración se realizó a través de la comparación de los niveles de agua transformado en elevaciones para el mes de evaluación (23 abril 2019), en donde se tuvo una diferencia menor al medio metro y este valor estaría validada para una modelo a nivel regional como lo es para la RNPS.

Tabla 8. Iteraciones del modelo bidimensional

iteración	rio	n	Estación	Nivel Medido	Nivel Modelado	Diferencia	Observaciones
1	Marañón	0.04	San Regis	101.973	101.96	-0.013	Cond. Iniciales del 1
	Ucayali	0.036	Requena	106.718	105.459	-1.259	Sep. - 15 oct 2018,
	Huallaga	0.035					simulación del
	Tigres	0.035					15 Oct 2018 -
	Tapiche	0.035					15 Ene 2019,
	Pacaya	0.035					6h de paso y
	Samiria	0.035					Floodp= 0.2
2	Marañón	0.04	San Regis	101.973	101.96	-0.013	Cond. Iniciales del 1

Ucayali	0.04	Requena	106.718	106.341	-0.377	Sep. - 15 oct 2018, simulación del 15 Oct 2018 - 15 Ene 2019, 6h de paso y Floodp= 0.2
Huallaga	0.035					
Tigres	0.035					
Tapiche	0.035					
Pacaya	0.035					
Samiria	0.035					

Los valores de coeficientes de Manning en el dominio computacional se muestran en la figura 65. El estudio de Papaioannou (2021); analiza las diferentes fuentes de entrada y estructuras del modelo en la salida de los modelos hidrológicos, donde recomienda identificar un DEM que represente con mayor precisión la geometría del río, también se menciona la importancia de la optimización de los valores de coeficientes de Manning para reflejar el fondo del lecho, y recomienda el análisis del modelo con diferentes estructuras.

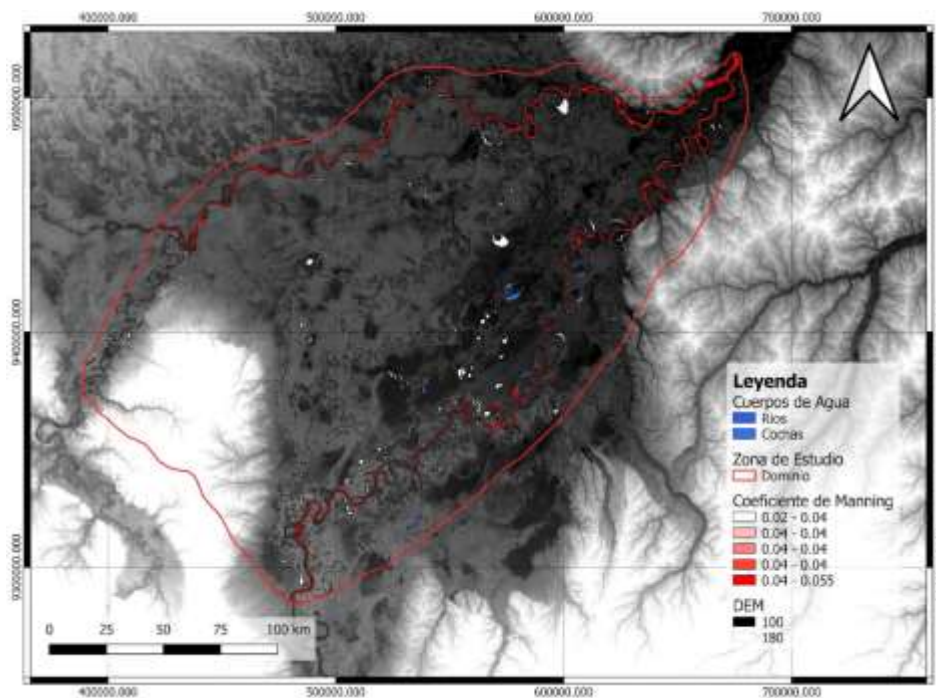


Figura 65. Valores de los coeficientes de manning para los ríos y cochas

En la figura 66 se muestra la simulación hidráulica e hidrodinámica en el tiempo “0 días” como mínima inundación y en la figura 67 en el tiempo “213 días” como máxima inundación a nivel de todo la Reserva; y en las zonas de mayor interés es en la confluencia de los ríos Marañón y Ucayali, esta zona está altamente conectada entre sí por cochas y canales, que en épocas de crecida se llega a observar una alta conectividad lateral (inundación por los ríos). También, se aprecia la recarga de estas cochas y como estas se conectan hacia los demás canales y ríos colindantes dentro de la Reserva. Con respecto a los niveles de agua, se muestra

que los ríos Huallaga, Marañón y Ucayali se encuentran entre los 10 m a 30 m de profundidad, esta última; se registran cercano a la confluencia del Marañón y Ucayali que dan origen al río Amazonas.

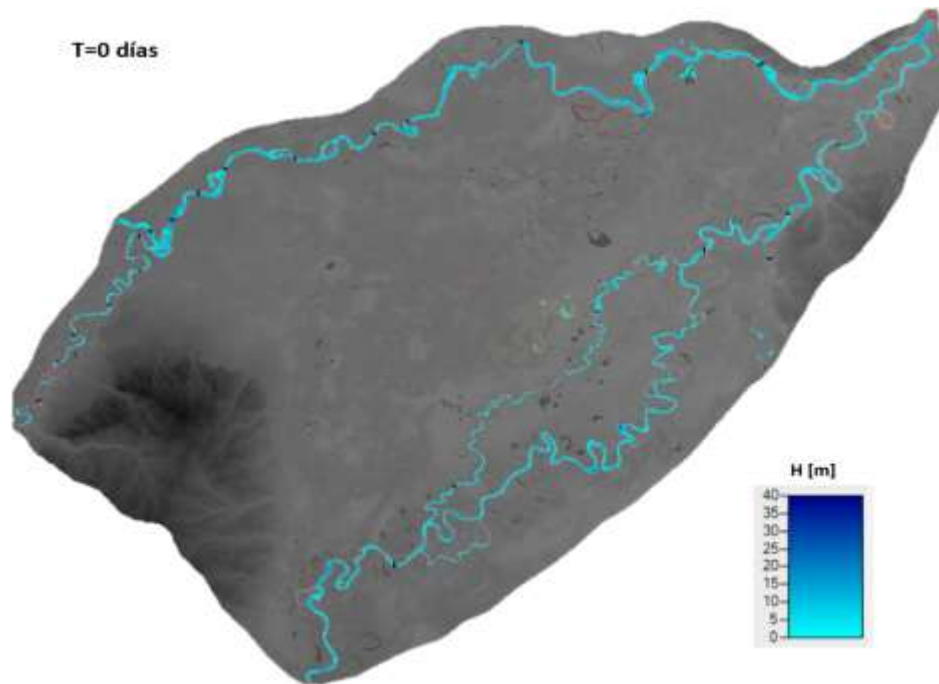


Figura 66. Simulación mínima hidráulica e hidrodinámica en la RNPS

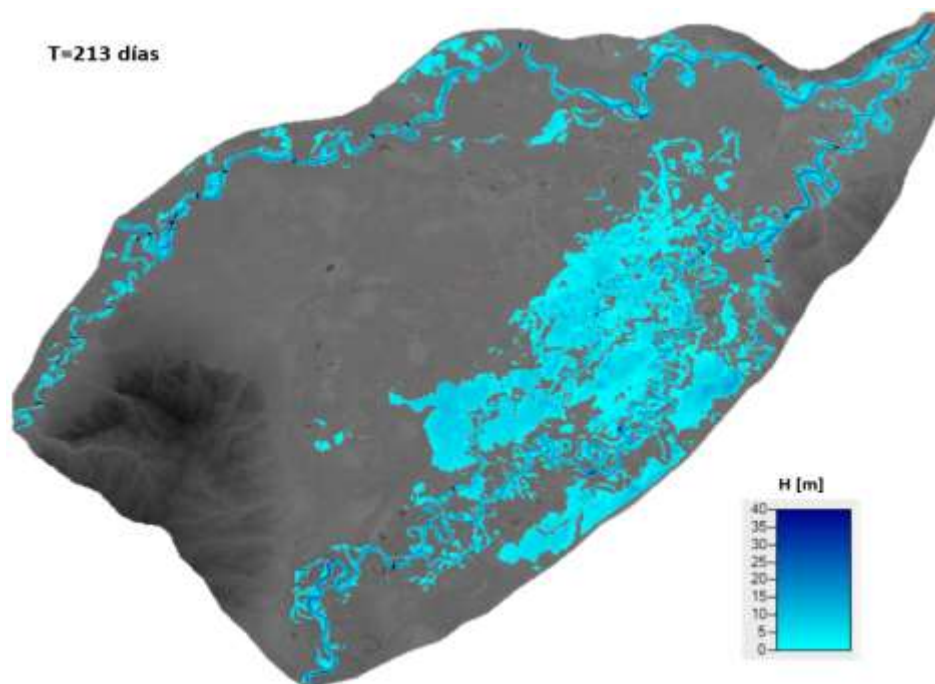


Figura 67. Simulación hidráulica e hidrodinámica en su máxima avenida en la RNPS

Según los resultados como se muestran en la figura anterior se llegan a concluir que la mayor conectividad lateral (tiempo de llegada más rápido con mayor duración) se da desde los

ríos Puinahua y Ucayali hacia la llanura de inundación, también; la mayor área de inundación se localiza en la subcuenca del Pacaya, la cual está altamente correlacionada con las características geomorfológicas en la RNPS, y por otro lado; la mayor afluencia localizada a la llanura de inundación es causada por el desbordamiento de las riberas del Puinahua.

#### 4.3.1. Estabilidad del modelo bidimensional

Con respecto a la estabilidad del modelo, en la figura 68 se muestra el número de courant para una simulación hidráulica e hidrodinámica para la máxima inundación, Los valores tienen un rango de 0 a 5 debido a que se usó el “solver” de onda difusiva y esta se resuelve de forma implícita, por lo que se muestra menores valores de courant en la llanura de inundación y mayores valores en los ríos, esto puede deberse al tamaño de las mallas, el paso del tiempo y por qué los ríos fueron interpolados con batimetría escasa.

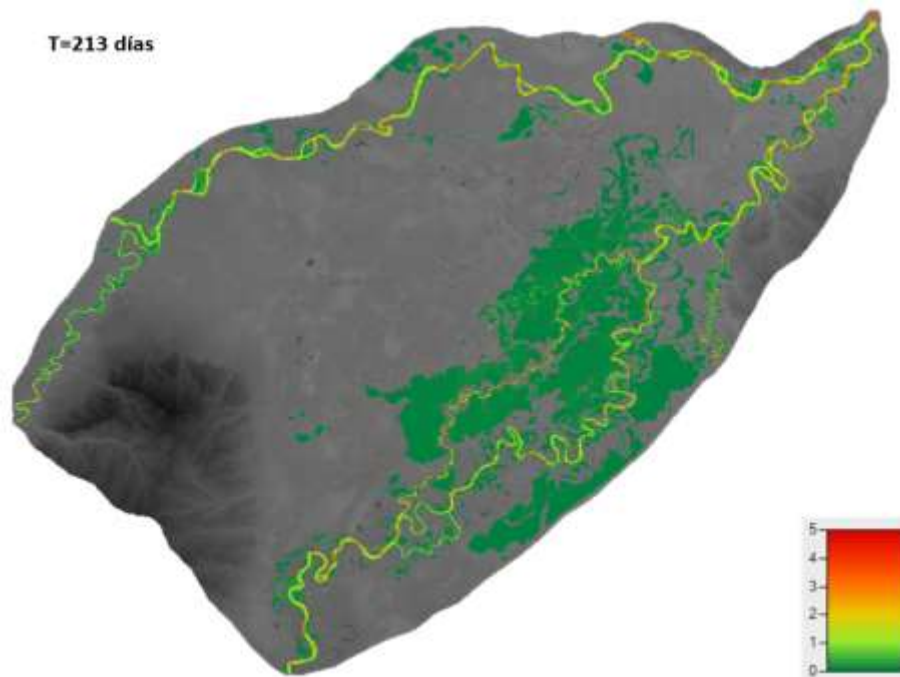


Figura 68. Numero de courant en la simulación hidráulica e hidrodinámica para la máxima inundación

Para el error de volumen en la figura 69 se muestra el error generado en la simulación del modelo bidimensional calibrado obteniendo un valor mucho menor a al 1%, siendo un modelo estable.

```

*** Total Volume Accounting (for the entire model) in 1000 m^3 ***

Total Boundary Flux of Water In      1168863694.
Total Boundary Flux of Water Out     1161171423.

Starting Volume                       10658799.
Ending Volume                         18355609.

Error      Percent Error
****      *****
4540.      0.000385

```

Figura 69. Error de volumen acumulado en la simulación calibrado

#### 4.3.2. Rutas de descargas y conectividad lateral

En la interacción del río-planicie aluvial conocida por su abreviación RPA (Bó, Malvárez, 1994), la inundación es el principal encargado de mantener las interacciones y productividad ecosistémica y de los organismos del sistema fluvial. La variación de las inundaciones puede afectar su duración y nivel de agua, dependiendo de las condiciones del clima, geomorfología e hidrología de la zona (Junk et al., 1989).

De acuerdo con Junk et al. (1989) los ríos son los responsables de la diversidad de hábitats y el enriquecimiento de los suelos, gracias al transporte de sedimentos y el procesos de erosión lateral, conllevando a una alta diversidad de especies de flora y fauna; por tal motivo, en la figura 70 se representa a nivel gráfico la conectividad lateral a través de la simulación hidráulica e hidrodinámica del dominio, las flechas de esa figura muestran la trayectoria del flujo (conectividad lateral) entre los ríos y la llanura de inundación, donde las flechas de color negro son las direcciones de entrada para los ríos Huallaga, Marañón y Ucayali hacia la Reserva; también se puede observar las de flechas azules son las de salida de la Reserva hacia los ríos Huallaga, Marañón y Ucayali por parte de los ríos Pacaya y Samiria. También muestra el tiempo máximo que tarda una celda en mojarse. Los valores más pequeños significan que la celda se inunda antes que las celdas que tienen valores de tiempo de llegada mayores.

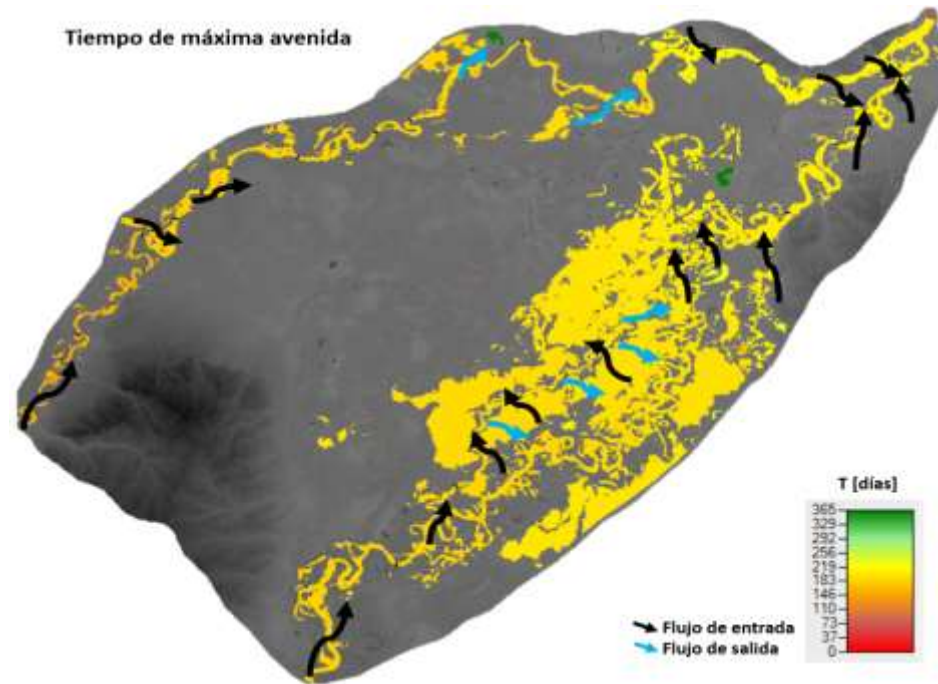


Figura 70. Tiempo máximo de llegada de la onda de crecida para todo el dominio del modelo

En la figura 71, figura 72 y figura 73, se muestran las zonas con mayor conectividad lateral hacia los ríos Pacaya y Samiria, donde se aprecia una mayor inundación por parte del canal de Puinahua hacia la Reserva, también; se puede apreciar que antes de llegar hacia los ríos, primero inunda a las cochas existentes que se mantienen inundadas permanente o semipermanentemente durante el ciclo hidrológico; y luego el flujo llega hacia los ríos Pacaya y Samiria. Comparando con los resultados de Reis, et al. (2018) se tiene una mayor área de inundación entre el río Ucayali el canal de Puinahua, pero no cuentan con una misma escala de temporalidad debido a que los resultados de la simulación representan la conectividad lateral por parte de la influencia hidrodinámica fluvial y excluyendo la influencia hidrológica, por lo que no se aprecia áreas de inundación en la parte central o zonas muy alejadas de los ríos aportantes.

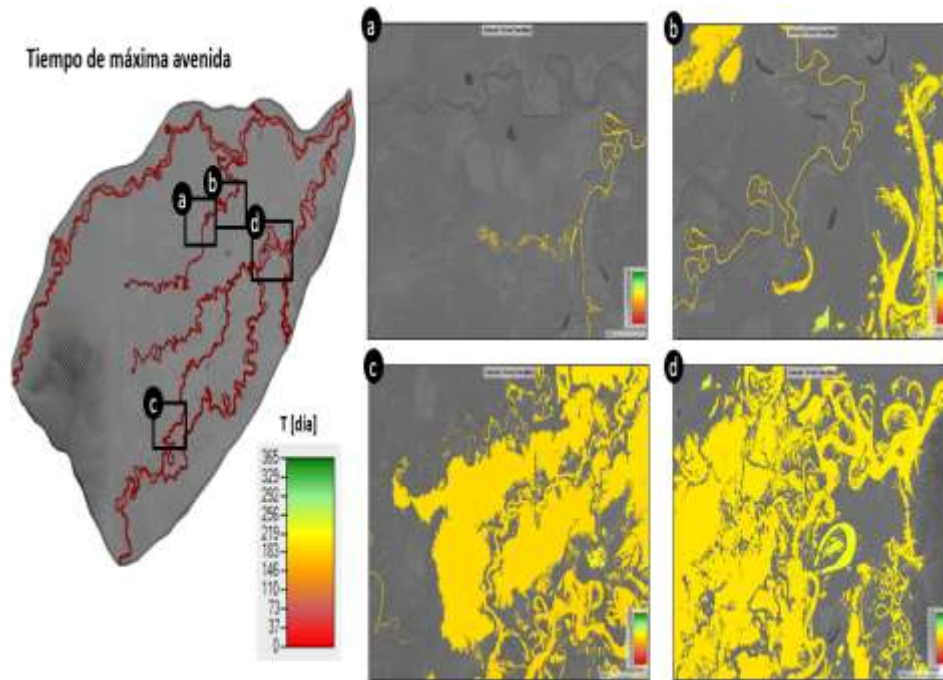


Figura 71. Tiempo máximo de llegada de la onda de crecida para todo el dominio del modelo, a) y b) conectividad por el río Samiria, c) y d) conectividad por el río Pacaya

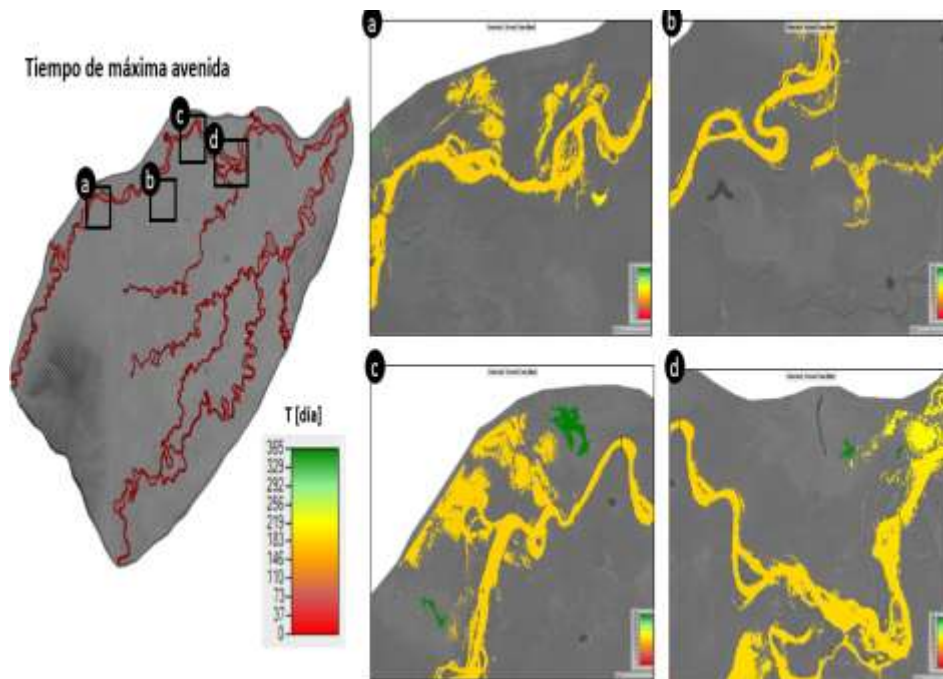


Figura 72. Tiempo máximo de llegada de la onda de crecida para todo el dominio del modelo, a), b) y c) conectividad por el río Marañón, d) conectividad por el río Samiria



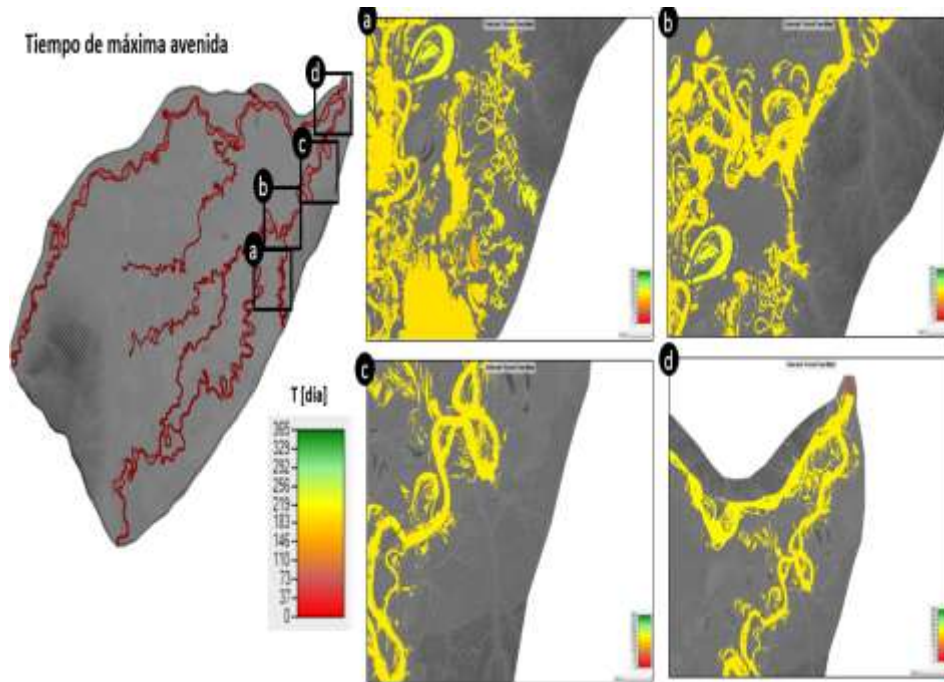


Figura 73. Tiempo máximo de llegada de la onda de crecida para todo el dominio del modelo, a) conectividad por el río Tapiche, b) y c) conectividad por el río Ucayali; y d) conectividad en la confluencia del río Marañón y Ucayali

En los sistemas RPA, se tiene registrado que anualmente ocurren como mínimo un evento de inundación, lo cuales tienen efectos sobre los componentes de la biota (Neiff, 1990; Neiff et al., 1994). Dichos efectos pueden conllevar a mutaciones en la anatomía, morfología, fisiología o etología de las especies con el fin de adaptarse a los cambios en los ciclos de inundación (Bó y Malvárez, 1994). En la tabla 9 se muestran los resultados del área de inundación por cada mes para el año hidrológico 2018 - 2019, donde se puede apreciar que la mínima inundación se encuentra entre los meses de septiembre a noviembre y para la máxima inundación entre los meses de enero a abril. También se puede apreciar el porcentaje de inundación con respecto al área total del dominio establecido, en donde la máxima inundación es del 19% del área total del dominio computacional.

Tabla 9. Áreas de inundación con respecto al dominio del modelo bidimensional

Año hidrológico	Área (km <sup>2</sup> )	Área inundada (%)
15 septiembre 2018	566.32	2
15 octubre 2018	1047.81	3
15 noviembre 2018	2044.55	6
15 diciembre 2018	3186.53	9
15 enero 2019	5022.49	14
15 febrero 2019	6111.12	18
15 marzo 2019	6549.80	19
15 abril 2019	6255.49	18
15 mayo 2019	4981.19	14
15 junio 2019	3760.56	11
15 julio 2019	3434.53	10
15 agosto 2019	3202.58	9
Mínima inundación	510.77	1
Máxima inundación	6698.92	19

En la figura 74 se puede observar el hidrograma de caudales en los diversos tramos del río Huallaga, esto nos da entender que, a lo largo del río, hay descargas que disminuye debido a las entradas hacia la Reserva, a través de cochas y/o canales.

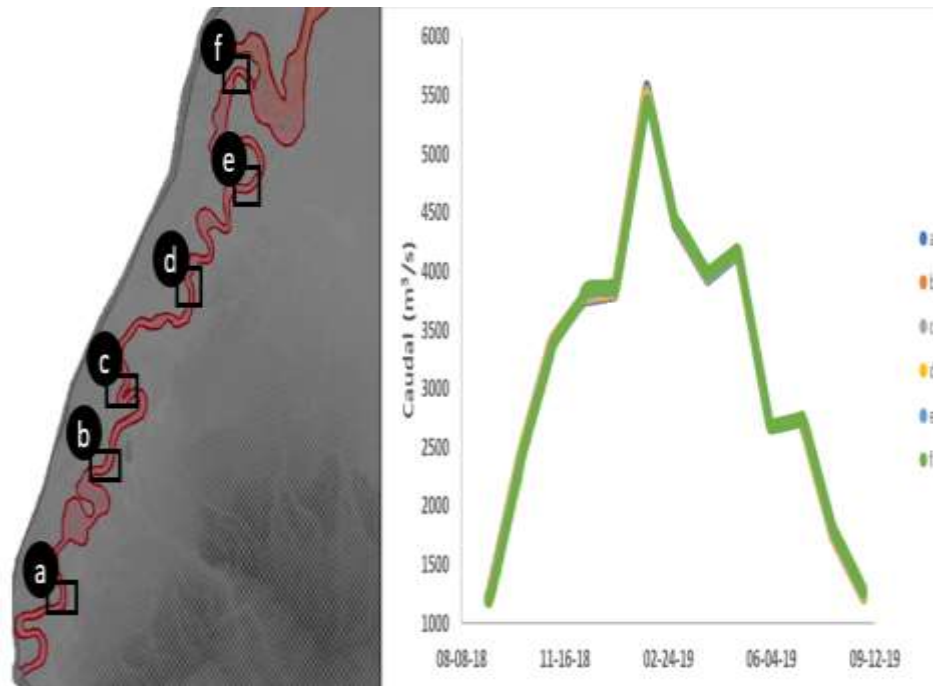


Figura 74. Hidrogramas de caudales en diversos tramos del río Huallaga

En la figura 75 se puede observar el hidrograma de caudales en los diversos tramos del río Huallaga, esto nos da entender que, a lo largo del río, hay descargas que disminuye debido a las entradas hacia la Reserva, a través de cochas y/o canales.

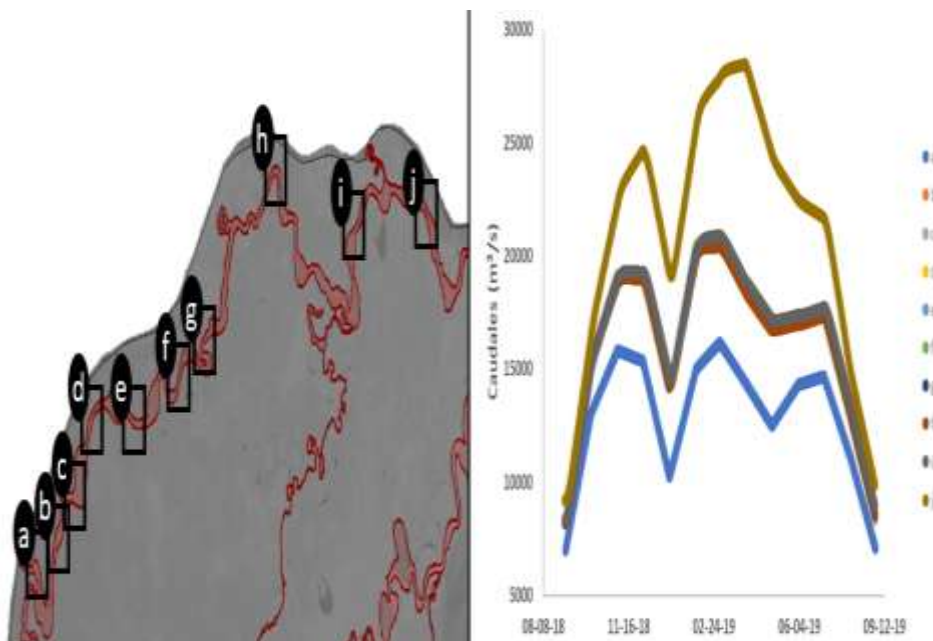


Figura 75. Hidrogramas de caudales en diversos tramos del río Marañón

En la figura 76 se puede observar el hidrograma de caudales en los diversos tramos del río Ucayali, esto nos da entender que a lo largo del río hay descargar que disminuye debido a las entradas hacia la Reserva, a través de cochas y/o canales.

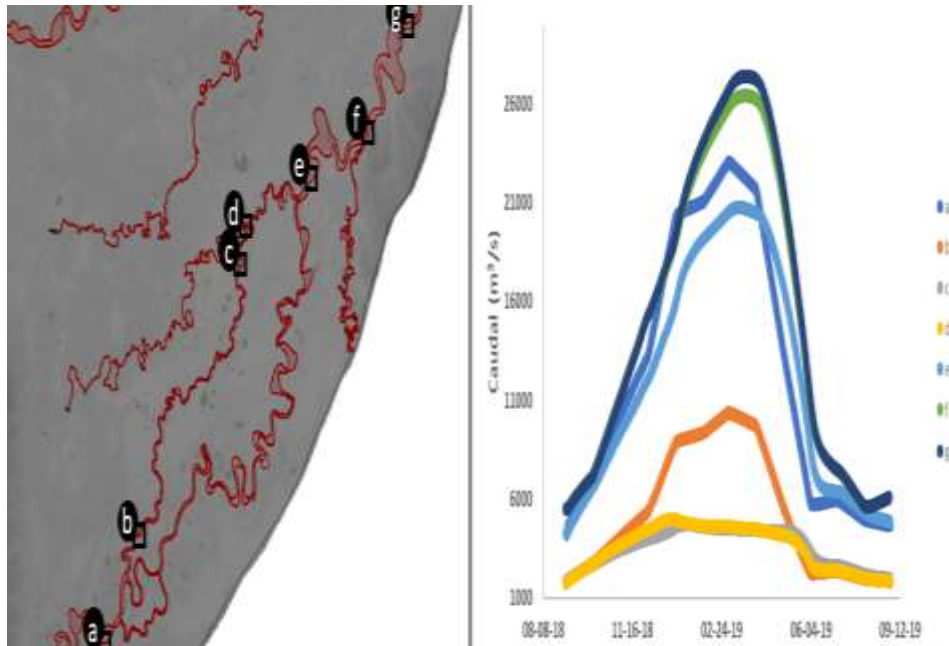


Figura 76. Hidrogramas de caudales en diversos tramos del río Ucayali

En la figura 77 muestra el hidrograma de salida para el río Amazonas en el cual se registra un caudal máximo de 56459.2 m<sup>3</sup>/s para la quincena del mes de marzo de 2019.

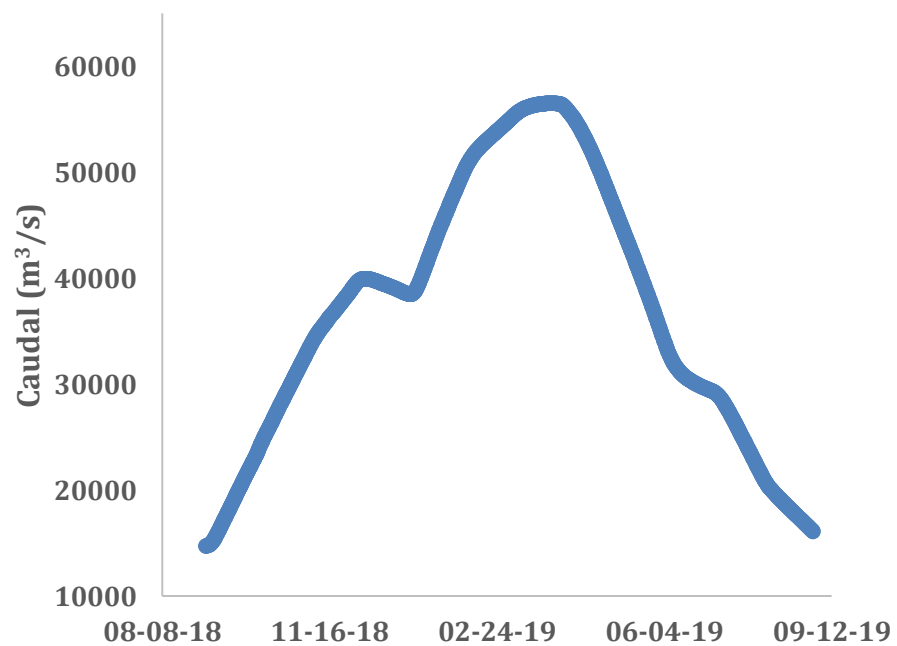


Figura 77. Caudales máximos de salida del modelo bidimensional en el río Amazonas

### 4.3.3. Flora y fauna en la Reserva Nacional Pacaya Samiria

Las inundaciones en planicies aluviales con grandes extensiones son procesos que contribuyen al enriquecimiento de la biodiversidad. A través del transporte de sedimentos y los procesos de erosión y deposición se genera la formación islas, lagunas, canales laterales y canales inactivos, entre (Ringuelet, 1963; Neiff, 1981). Con respecto a la duración e intensidad de las inundaciones, son factores que permiten las adaptaciones en la fisonomía vegetal concadenando la diversidad de hábitats de la fauna silvestre (Bó y Malvárez, 1994). En la figura 78 y figura 79 se acoplaron los resultados del modelamiento hidrológico e hidrodinámico con la cobertura vegetal y geomorfología de la zona de estudio (dominio computacional) respectivamente.

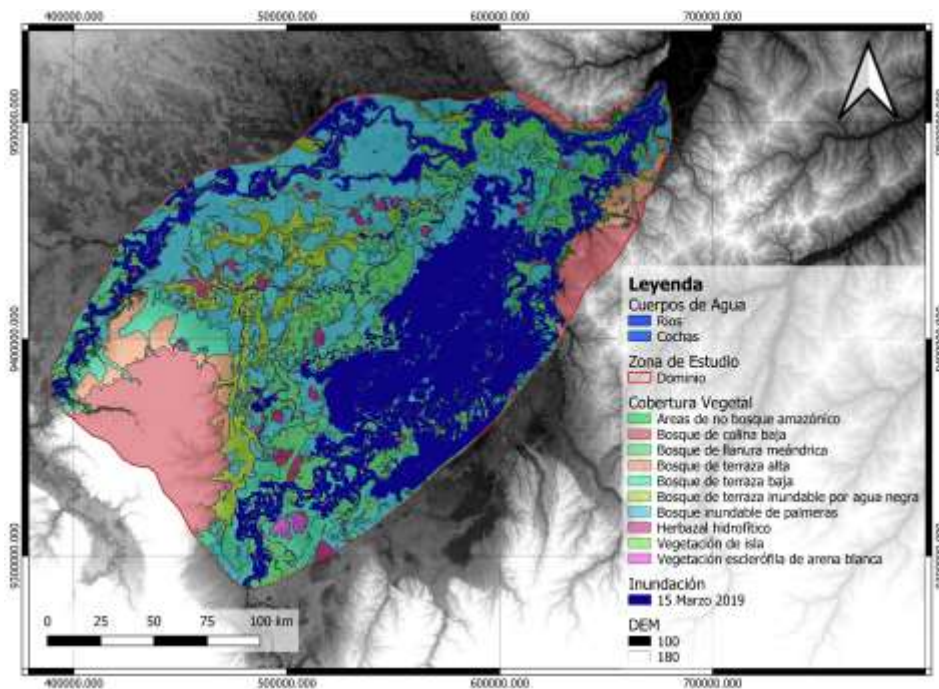


Figura 78. Inundación fluvial máxima con un área de 14604.59 km<sup>2</sup> acoplado al mapa de cobertura vegetal en el dominio computacional

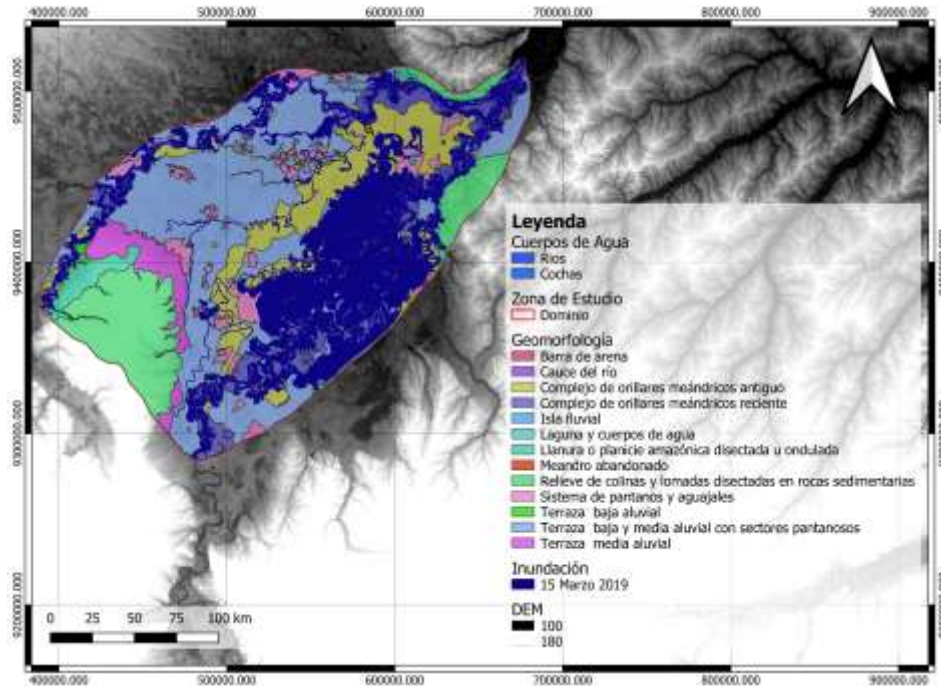


Figura 79. Inundación fluvial máxima con un área de 14604.59 km<sup>2</sup> acoplado al mapa de geomorfología en el dominio computacional

Los ciclos típicos de inundación favorecen la existencia de una alta diversidad ecológica en la RNPS. Por lo que la relación existente entre la migración de la fauna se relacionaría las áreas de mayor inundación con las limitaciones de movilidad de las especies terrestre, pero con las especies que no tienen esta limitante guardarán relación con los niveles registrados en estas zonas y en toda la Reserva. El estudio de la relación de eventos extremos que afectan los flujos de los ríos y su relación con la vulnerabilidad ecosistémica, son analizados en diferentes puntos del planeta, es así que el estudio de Roberto F., A. Malvárez (2000) menciona que los eventos extremos, definido como tal, por la elevación del nivel de agua y la permanencia prolongada del evento, generan cambios en el régimen hidrológico en la zona y tienen impacto en la flora y fauna.

La depresión de Ucamara alberga un sistema fluvial dinámico que generan la activa migración de los canales, y también es responsable de los procesos de sedimentación y de avulsión, este último consiste en el cambio del cauce principal del río por uno nuevo (Kalliola et al.,1992). Sumado a ello, junto con el régimen hidrológico estacional, las condiciones topográficas, y climáticas de la zona, se da la formación de la RNPS.

Los pobladores realizan la actividad de pesca principalmente en las áreas cercanas a sus comunidades, adyacentes al río Pacaya con previa obtención de la autorización de ingreso en el Puesto de Vigilancia del SERNANP y en el canal del Puinahua. En épocas de crecientes

también pescan en los caños, debido al incremento de los niveles de agua. Con respecto a la conectividad biológica con los ciclos de inundabilidad, en la figura 80, figura 81 y figura 82 se observan las inundaciones fluviales durante el año hidrológico 2018 - 2019 cerca de las áreas de pesca para las especies de cahuara, zúngaro mota, boquichico y carachama.

Los resultados de la simulación para el mes de octubre del 2018 se observa el inicio de ingreso del río por parte del canal de Puinahua hacia la Reserva conectando directamente con las cochas y luego hacia el río Pacaya, siendo estas fechas en la época de vaciante y transición para el río Ucayali (figura 68).

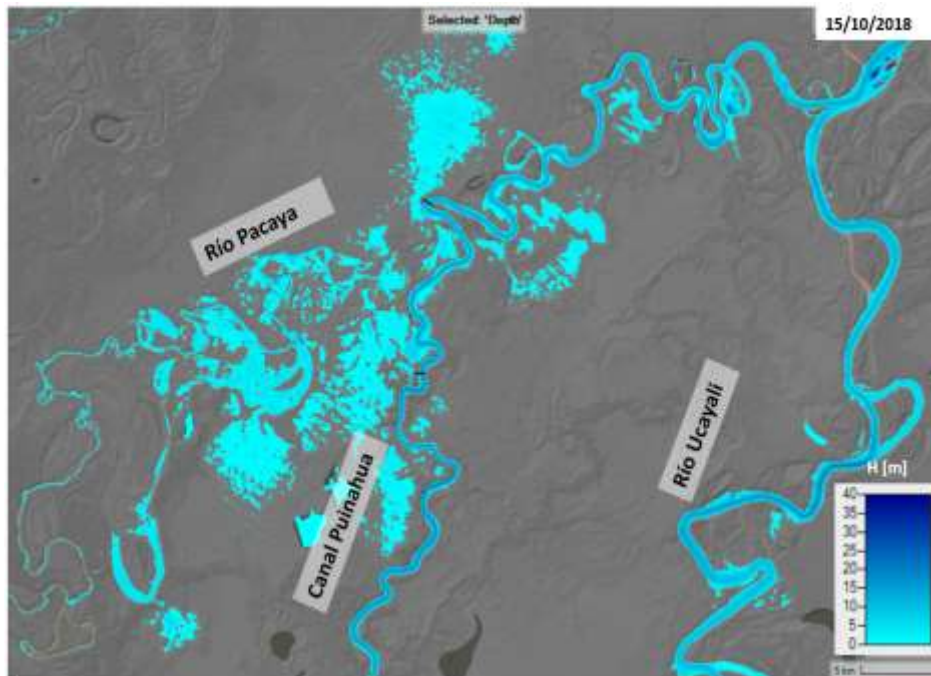


Figura 80. Conectividad hidrodinámica hacia la RNPS por el canal de Puinahua en el mes de octubre del 2018

Los resultados de la simulación para el mes de enero del 2019 se observa el aumento de la inundación hacia la Reserva por parte del canal de Puinahua (figura 69).

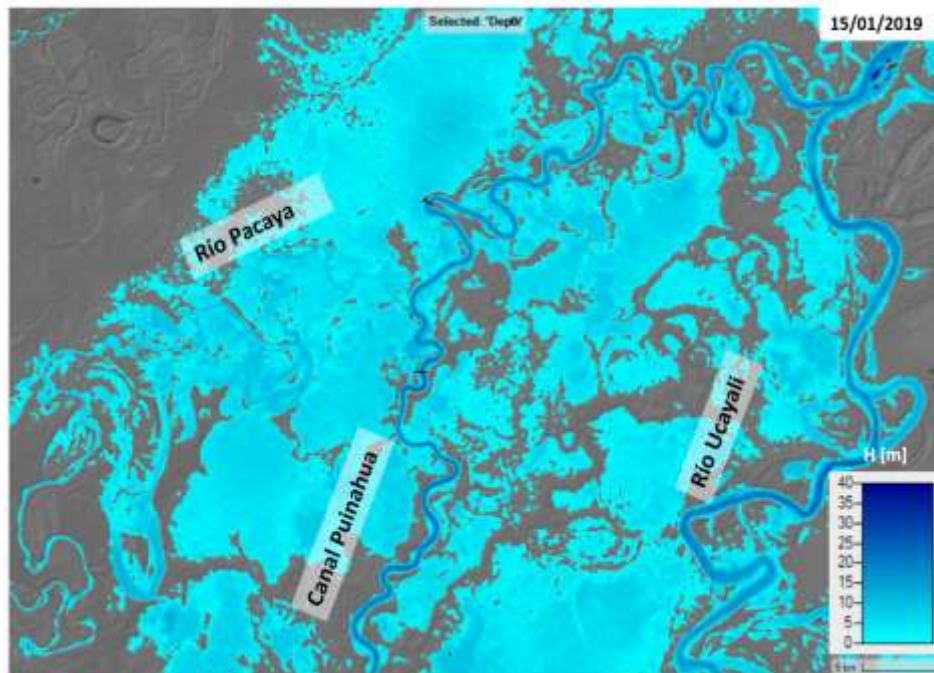


Figura 81. Conectividad hidrodinámica hacia la RNPS por el canal de Puinahua en el mes de enero del 2019

Los resultados de la simulación para el mes de abril del 2019 aún se observa la inundación hacia la Reserva por parte del canal de Puinahua, pero también se observa un incremento de la inundación entre el canal y el río Ucayali (figura 70).

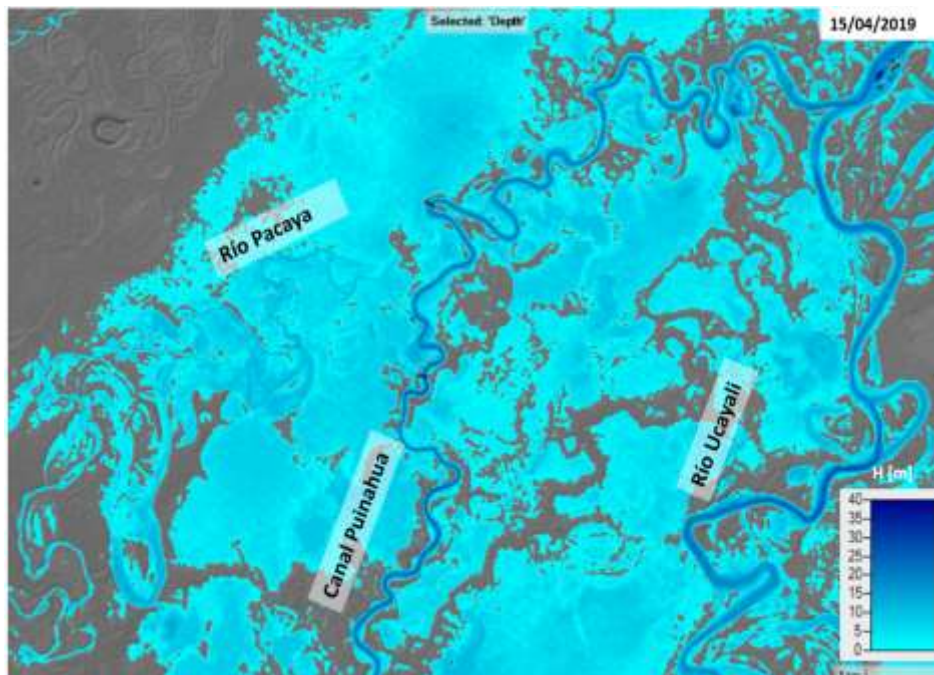


Figura 82. Conectividad hidrodinámica hacia la RNPS por el canal de Puinahua en el mes de abril del 2019



Finalmente, para la simulación del mes de julio del 2019, se observa un gran descenso de la inundación y esto está relacionado con el ciclo hidrológico encontrándose en la época de vaciante para el río Ucayali (figura 83). Por otro lado, la topografía obtenida sobreestima la elevación debida a la densa vegetación, esto afecta en el cálculo del DEM y por ende en el proceso de simulación de la inundación. La caracterización de las áreas inundadas y las no inundadas podrían ser más precisas si se tuviese mayor cantidad de datos y si se tuviese mayor rango de tiempo de análisis. El análisis predictivo de inundación y la dinámica entre el cauce y la llanura aluvial se emplearán como línea base para diferentes estudios que requieran datos de la hidrodinámica de la zona, proporcionando datos cuantitativos de las características físicas de los ríos.

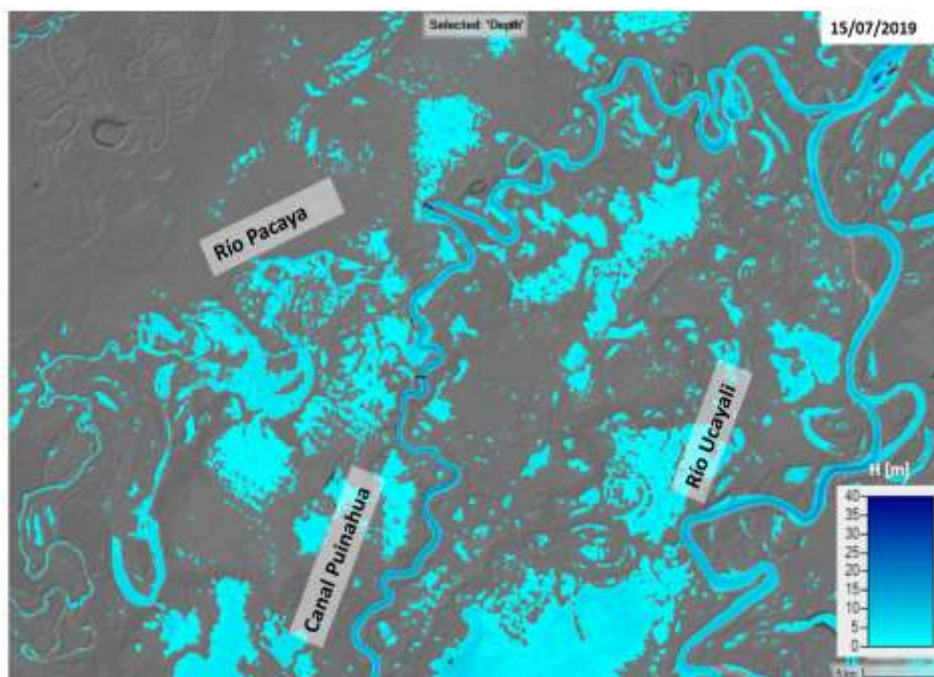


Figura 83. Conectividad hidrodinámica hacia la RNPS por el canal de Puinahua en el mes de julio del 2019

Las simulaciones pudieran describir y relacionar como las épocas de vaciantes y crecientes están relacionadas con los ciclos reproductivos de las especies de peces como el boquichico, llambina, carachama y zúngaro mota en las zonas de pesca mostrados en el boletín de WCS (2017) sobre el recurso pesquero en la cuenca del Pacaya. Por otro lado, una investigación realizada en la RNPS (SERFOR, 2017), el caimán blanco (*Caimán crocodylus*) es afectado por los ciclos de bajo caudal y niveles extremos mínimos de agua; por otro lado, el caimán negro (*Melanusuchus niger*) es una especie más adaptativa y no se ve muy afectado por dichos eventos. La caída de la abundancia de caimanes blancos se debió a que migraron hacia

áreas aisladas, buscando zonas de caudales estables. Cuando iniciaron las temporadas de inundación, dicha especie retorna a su área habitual dentro de la reserva (Bodmer, et al., 2013).

En la región amazónica, las variaciones del nivel de agua que superan el nivel máximo típico es un fenómeno muy recurrente. El aumento de los procesos erosivos en la parte alta de las cabeceras de cuencas genera el aumento en la carga de sedimentos en las aguas de la red de drenaje; las cuales, cuando llegan a la zona baja, producen inundación de las terrazas estacionales, donde se realizan actividades agrícolas. Uno de los ríos que más se caracterizan por presentar este fenómeno es el Marañón (MINSA, 2011 -PALMER MURGA).

La fauna amazónica y su sostenibilidad está relacionada con la variación en el nivel de agua. El estudio de Bodmer, et al. (2013), analiza la relación de la variación del nivel en el agua y su afectación a los delfines de río, es así como el estudio brinda datos de la sequía en el año 2010 que provocó la migración de los delfines del río Samiria provocada por la disminución en el tamaño de peces, que a su vez tiene relación con la disminución del flujo en los ríos y el transporte de nutrientes. En contraste a dicho evento; en el año 2012 se analizaron eventos de crecidas del río, correlacionado con datos de las poblaciones de peces, identificación de especies y número de población de delfines (Bodmer, et al., 2013)

Con el estudio de Bodmer podemos afianzar los resultados donde se correlaciona las variaciones en los niveles de agua y su impacto en la fauna amazónica. El impacto que se obtiene en las poblaciones de delfines durante eventos de crecidas o sequías son indicadores de la vulnerabilidad de la fauna frente a los eventos hidrológicos y como su relación ecosistémica depende de la variación de los flujos de agua. (Bodmer, et al., 2013).

El análisis de poblaciones de peces también es un indicador de la vulnerabilidad de las especies acuáticas y su relación con la variabilidad en los flujos de agua en los ríos de la llanura amazónica. Una variación tangible se dio en el año 2011 donde se pudieron ver la disminución de poblaciones de peces acarreada por la sequía del año 2010. En el año 2012 se observó una recuperación en el número de peces, que retornaban a una población normal luego del evento de crecientes de cauce extremos por dos años (Bodmer, et al., 2013).

Los impactos ocasionados por el aceleramiento de calentamiento global, las industrias extractivas y la expansión de las actividades humanas sobre territorio de conservación, son un desafío para la conservación de las áreas naturales y de las comunidades que alberga. Los

cambios en los niveles del agua se están volviendo cada vez más evidentes, incluidas las sequías extremas y las inundaciones persistentes más severas (Bodmer, et al., 2013).

Otra especie de análisis en dicho estudio son los caimanes, ya que se relaciona con los diferentes recursos alimenticios como aves, mamíferos, peces, reptiles e insectos. Su importancia ecosistémica y relación con la variación de los ríos, radica en que los caimanes usan los hábitats acuáticos y terrestres requiriendo de la disponibilidad de dichas áreas para desarrollarse y migran cuando ocurren eventos extremos de variación en el nivel de agua (Bodmer, et al., 2013).

Las inundaciones afectan a diversas especies como los mamíferos terrestres, roedores, ungulados y edentados, entre otros. Estas especies se ven afectadas por la variación en los regímenes de inundación, ya que eventos extremos disminuye las áreas de hábitat terrestre y reduce los corredores ecológicos. Por otro lado, las especies acuáticas como el bufeo colorado (*Inia geoffrensis*) y el bufeo gris (*Sotalia fluviatilis*) se ven beneficiados en su hábitat, ya que pueden acceder a zonas ricos en nutrientes y mayor cantidad de peces (SERFOR, 2017).

Por lo que; sumado a las variaciones cíclicas de los niveles de agua; la dinámica fluvial, modifica las formas fluviales y genera diferentes tipos de hábitats donde se desarrollan la gran diversidad de flora y fauna, que evolucionan en el tiempo. El resultado es un mosaico de ecosistemas ricos en nutrientes, que otorga a los organismos el hábitat para su desarrollo (Pouilly, 2004).

En el modelo bidimensional se consideró caudales de entrada como condiciones de borde para los ríos Huallaga, Marañón, Ucayali, Tigres, Tapiche, Pacaya y Samiria que fueron interpolados y calibrados (relación caudal – nivel) con los datos de caudales recolectados en campo en el 2018 y 2019 por parte del CITA-UTEC y con los datos de niveles de agua de las estaciones hidrométricas de Contamana, San Lorenzo, Lagunas, San Regis y Requena. Siendo únicamente de carácter hidrodinámico, debido a que no se consideró los aportes por escorrentías directa producto de las precipitaciones aguas arriba y en la zona de estudio. Adicionalmente, los datos topográficos obtenidos a nivel satelital (DEM) tienden a sobreestimar la elevación por la densa vegetación, lo que afecta la conectividad lateral en la simulación.

La determinación de las áreas inundadas y no inundadas en la simulación dependen de la temporalidad y cantidad de datos. Por lo que, el ciclo de inundaciones entre los ríos, cochas

y llanura de inundación son datos útiles de caracterización física ambiental para futuros estudios bioquímicos y geomorfológicos que requieren información hidrodinámica detallada.

## V. CONCLUSIONES

Se determinó la geometría del dominio computacional y las características hidráulicas representando la geomorfología típica de los ríos amazónicos de la llanura de inundación en la RNPS.

Se determinaron las condiciones de borde e iniciales para flujos de régimen no permanentes con los caudales interpolados en el año hidrológico 2018 - 2019 como datos de entrada para describir el proceso de inundación.

Se determinó la geometría del dominio computacional y las características hidráulicas representando la geomorfología típica de los ríos amazónicos de la llanura de inundación en la RNPS.

Se desarrolló el modelo bidimensional de las inundaciones fluviales en los ríos Huallaga, Marañón y Ucayali en la llanura de inundación de la RNPS para el año hidrológico 2018 – 2019. En donde el modelo bidimensional permitió describir el proceso de inundación guardando relación con la biodiversidad, los ciclos reproductivos, rutas de migración y de alimentación de la fauna; y sucesión ecológica relaciona con la dispersión y diversidad de flora por la aportación de sedimentos y nutrientes de cada río.

Se encontró que en épocas de inundación hay mayor migración de peces de la Reserva hacia los ríos y viceversa, beneficiando la actividad pesquera artesanal; la movilidad de la fauna terrestre se ve restringida a diferencia de la fauna semiacuática; y la fauna acuática se ve beneficiada al tener mayores canales de conexión; por último, la dinámica del ciclo hidrológico presenta un alto impacto en la diversidad y dispersión de las especies de flora.

El modelo bidimensional predijo el proceso de inundación mediante las rutas de descarga y conectividad lateral de los ríos Huallaga, Marañón y Ucayali hacia la Reserva Nacional Pacaya Samiria para el periodo 2018-2019; identificado las máximas y mínimas extensiones de áreas de inundación y elevaciones de los niveles máximos y mínimos de los ríos.

## **VI. PROPUESTAS A FUTURO**

El análisis obtenido del modelo bidimensional serviría como una herramienta de línea base física ambiental de referencia, para futuros trabajos de investigación y proyectos de infraestructura fluvial colindantes a la Reserva Nacional Pacaya Samiria.

Implementar la influencia hidrológica con variación espacio temporal para el año hidrológico 2018 – 2019.

Realizar un análisis hidrológico de datos históricos de los últimos 30 años en la RNPS.

Determinar el límite de ocurrencia de inundación lateral con los caudales mínimos, máximos e históricos.

Determinar la ubicación geográfica de las cochas de recarga, permanentes y semipermanentes según los tiempos y duración de avenidas mínimas y máximas.

Realizar un análisis de sensibilidad de la altura del agua con el cambio de coeficientes de manning durante el año hidrológico 2018 – 2019.

Realizar la batimetría de los tributarios y canales aportante hacia la Reserva Nacional Pacaya Samiria.

Realizar la corrección del DEM con respecto a la altura de la cobertura vegetal representativa en la zona de estudio para obtener el DTM.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abad, J., Vizcarra, J., Paredes, J., Montoro, H., Frias, C., Holguin, C. (2013). Morphodynamics of the Upper Peruvian Amazonian rivers, implications into fluvial transportation. EUT Edizioni Università di Trieste. Int. Conf. IDS2013. 1–10.  
[https://www.researchgate.net/publication/264896129\\_Morphodynamics\\_of\\_the\\_upper\\_peruvian\\_amazonian\\_rivers\\_implications\\_into\\_fluvial\\_transportation](https://www.researchgate.net/publication/264896129_Morphodynamics_of_the_upper_peruvian_amazonian_rivers_implications_into_fluvial_transportation)
- ADCP. (2018). Medición de caudal por el método acústico doppler (ADCP) – avanzado. [En línea]: Universidad Estatal Paulista - UNESP
- Bodmer, F., Tula, P., Antunez, M., Bodmer, K. C. (2013). Cambio climático y fauna silvestre en la Amazonía peruana. Impacto de la sequía e inundaciones intensas en la Reserva Nacional Pacaya Samiria. 10.13140/2.1.3954.7685.  
<https://keneamazon.net/Documents/Publications/Virtual-Library/Ecosistemas/30.pdf>
- Bó, R., & Malvárez, A. (1999). Las inundaciones y la biodiversidad en humedales. Un análisis del efecto de eventos extremos sobre la fauna silvestre. Tópicos sobre humedales subtropicales y templados de Sudamérica. Laboratorio de Ecología Regional, Departamento de Ciencias Biológicas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Argentina. 147-168.  
[http://server.ege.fcen.uba.ar/gieh/PDF\\_MIOS/Rober\\_mab.pdf](http://server.ege.fcen.uba.ar/gieh/PDF_MIOS/Rober_mab.pdf)
- Chow, V. (1994). Hidráulica de canales abiertos. California Spanish Books. McGraw-Hill. No. TC175.C6818.  
[https://www.academia.edu/43519012/Ven\\_Te\\_Chow\\_HIDRAULICA\\_DE\\_CANALES\\_ABIERTOS](https://www.academia.edu/43519012/Ven_Te_Chow_HIDRAULICA_DE_CANALES_ABIERTOS)
- CITA-UTEC. (2021). Ríos danzantes Guías metodológicas para el desarrollo de línea base física de los ríos en Andes-Amazonia. Universidad de Ingeniería y Tecnología. Lima, Perú. ISBN: 978-612-48794-0-1
- Dominguez, L., Szupiany, R., Latosinki, L., Trento, A., Abad, J. (2013). Efecto de la relación ancho/profundidad en cauces meandriformes. Instituto Nacional del Agua, Buenos Aires (Argentina). Mimeografiado. 11 p. <https://www.softlandperu.com/producto/flo-2d-pro/>
- Galarza, E. (2017). Plan Maestro Reserva Nacional Pacaya Samiria 2017 – 2021. Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas. Ministerio del Ambiente. 154 p.  
[https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/509828/RP\\_273-2017.pdf](https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/509828/RP_273-2017.pdf)

- Hergarten, S., Robl., J. (2015). I am modeling rapid mass movements using shallow water equations in Cartesian coordinates. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 15, 671–685. <https://nhess.copernicus.org/articles/15/671/2015/>
- Hernandez, N. (2016). Aproximación metodológica para la valoración de la incertidumbre en la parte alta de las curvas de calibración de caudales líquidos. Maestría en Ingeniería Énfasis en Ingeniería Civil y Ambiental. Universidad Tecnológica de Bolívar. <https://repositorio.utb.edu.co/bitstream/handle/20.500.12585/1639/0068928.pdf?sequence=1>
- IBER. (2022). [En línea]: Iber. (<https://www.cursosgis.com/que-aprenderas-en-nuestro-curso-de-modelizacion-hidraulica-bidimensional-con-iber-y-arcgis/#:~:text=Iber%20es%20un%20modelo%20hidrodin%C3%A1mico,de%20h%C3%A1bitat%20y%20procesos%20hidrol%C3%B3gicos>, 26 ene. 2022)
- Jensen, K., Mcdonald, K., Podest, E., Rodriguez-Alvarez, N., Horna, V., Steiner, N. (2018). Assessing L-band GNSS-reflectometry and imaging radar for detecting sub-canopy inundation dynamics in a tropical wetlands complex. *Remote Sensing*, 10(9), 1431. <https://www.mdpi.com/2072-4292/10/9/1431>
- Pouilly, M., Beek, M., Moraes, R., Ibañez, C. (2004). Diversidad biológica en la llanura de inundación del Río Mamoré. Importancia ecológica de la dinámica fluvial. Centro de Ecología Simón I. Patifio, Santa Cruz, Bolivia. 383 p. [https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins\\_textes/divers17-05/010036904.pdf](https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers17-05/010036904.pdf)
- Marin, J., Flores, G., Abad, J. D. (2020). Similarities and differences between meandering and anabranching rivers. AGU Fall Meeting 2020
- Leopold, L.B., Wolman, M.G., Miller, J.P. (1964). *Fluvial Processes in Geomorphology*. Freeman, San Francisco, 522 p. <https://pubs.er.usgs.gov/publication/70185663>
- Fang, L., Nowak, G., Neill, T.J., Welsh, A.H. (2014). CUTOFF: A Spatio-temporal imputation method. *Journal of Hydrology* 519 (2014) 3591–3605
- OTCA. (2009). *Perspectivas del Medio Ambiente en la Amazonía*, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y la Organización del Tratado de Cooperación Amazónica - OTCA. <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/geo-amazonia-perspectivas-medio-ambiente-amazonia>
- Papaioannou, G., et al. (2021). Flood Inundation Modeling Approach for Urban and Rural Areas in Lake and Large-Scale River Basins. *Water* 2021, 13, 1264. <https://doi.org/10.3390/w13091264>



- Park, E., Latrubesse, E. M. (2017). Remote sensing and field control assessed the hydro-geomorphologic complexity of the lower Amazon River floodplain and hydrological connectivity. *Remote Sensing of Environment*, 198, 321-332. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.021>
- Pérez, J. Escobar, J. Fragoso, J. (2018). Modelación hidráulica 2D de inundaciones en regiones con escasez de datos. El caso del Delta del río Ranchería, Riohacha-Colombia. *Información Tecnológica*. Vol 29(4). 143-156. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642018000400143>
- Reis, V., et al. (2019). Characterizing seasonal dynamics of Amazonian wetlands for conservation and decision making. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 29(7), 1073-1082. <https://doi.org/10.1002/aqc.3051>
- Roberto F., A. Malvárez. (2000). Las inundaciones y la biodiversidad en humedales. un análisis del efecto de eventos extremos sobre la fauna silvestre. Laboratorio de Ecología Regional, Departamento de Ciencias Biológicas. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Argentina. [http://server.ege.fcen.uba.ar/gieh/PDF\\_MIOS/Rober\\_mab.pdf](http://server.ege.fcen.uba.ar/gieh/PDF_MIOS/Rober_mab.pdf)
- Rosenqvist, J., Rosenqvist, A., Jensen, K., McDonald, K. (2020). Mapping of Maximum and Minimum Inundation Extents in the Amazon Basin 2014–2017 with ALOS-2 PALSAR-2 ScanSAR Time-Series Data. *Remote Sensing*, 12(8), 1326. <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/8/1326>
- Serfor. (2017). Mapa de vulnerabilidad de ecosistemas y hábitats críticos frente al cambio climático de la Amazonía peruana. Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre. Departamento de Loreto. [http://www.serfor.gob.pe/programaforestal/wp-content/uploads/2018/10/1\\_INFORME-NACIONAL\\_-MAPA-DE-VULNERABILIDAD-DE-ECOSITEMAS.pdf](http://www.serfor.gob.pe/programaforestal/wp-content/uploads/2018/10/1_INFORME-NACIONAL_-MAPA-DE-VULNERABILIDAD-DE-ECOSITEMAS.pdf)
- Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas - Jefatura de la Reserva Nacional Pacaya Samiria. (2009). Plan Maestro Reserva Nacional Pacaya Samiria 2009 – 2013. Hecho el Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 2009-15094. ISBN: 978-612-45650-1-4. [https://old.sernanp.gob.pe/sernanp/archivos/biblioteca/publicaciones/RN\\_Pacaya/Plan%20Maestro%202009-2014%20RN%20Pacaya%20Samiria%20ver%20pub.pdf](https://old.sernanp.gob.pe/sernanp/archivos/biblioteca/publicaciones/RN_Pacaya/Plan%20Maestro%202009-2014%20RN%20Pacaya%20Samiria%20ver%20pub.pdf)

- Wild Conservation Society. (2017). El recurso pesquero en la cuenca del Pacaya. D&S GRAF AMAZONIA E.I.R.L. Iquitos, Perú.  
<https://library.wcs.org/doi/ctl/view/mid/33065/pubid/DMX3377600000.aspx>
- Wilson, M., Bates, P., Alsdorf, D., Forsberg, B., Horritt, M., Melack, J., ..., Famiglietti, J. (2007). Modeling large-scale inundation of Amazonian seasonally flooded wetlands. *Geophysical Research Letters*, 34(15).  
[https://escholarship.org/content/qt3t58v454/qt3t58v454\\_noSplash\\_d9dc46cee5d803f9afdca7780a361352.pdf?t=n0u9i6](https://escholarship.org/content/qt3t58v454/qt3t58v454_noSplash_d9dc46cee5d803f9afdca7780a361352.pdf?t=n0u9i6)
- US Army Corps of Engineers. (2022). “HEC-RAS User’s Manual.”  
<https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/rasum/latest>

## **VIII. ANEXOS**

## ANEXO I



Figura 84. Puesto de Control PV5 - Alegre



Figura 85. Canal del Puinahua y caserío Breña



Figura 86. Puesto de control Samiria



Figura 87. Colocación de puntos de control para el registro de niveles, caudales y batimetría del río

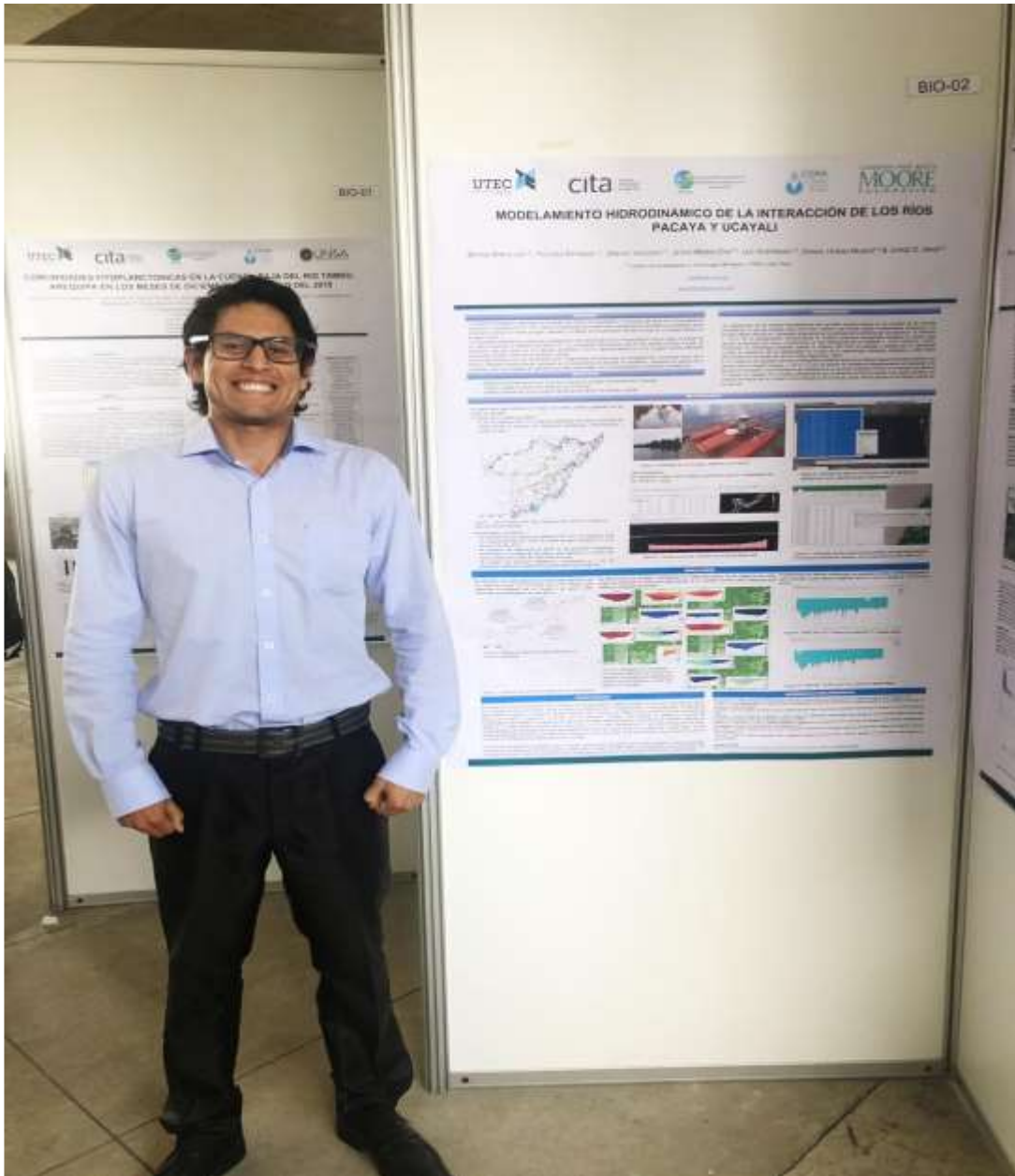


Figura 88. Expositor del Congreso Nacional del Agua 2020



Figura 89. Mediciones de la hidrodinámica de los ríos Pacaya y Samiria en el año 2020



Figura 90. Equipo de mediciones de campo conformado por investigadores, guardaparques y pobladores de la zona de la Reserva Nacional Pacaya Samiria



Figura 91. Mediciones en campo para la obtención de parámetros hidráulicos de los ríos Huallaga, Marañón y Ucayali



## ANEXO II

```
### Completacion de datos mensuales faltantes
### Método CUTOFF (Feng et al, 2014): Imputacion optimizada de una correlacion cruzada
### http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.11.012
### https://github.com/hydrocodes
rm(list=ls())
dev.off()
library(cutoffR)
setwd("D:/")
# Ingresar una base de datos en csv: %b-%y (date), datos mensuales (cabecera con codigo de
estaciones)
data <- read.csv("pp_total_diario18-19.csv",header=TRUE, check.names = F,
stringsAsFactors = F)
# Ingresar la ruta y el nombre del archivo de salida Correlation-Spearman
output <- "D:/pp_18-19_completo.csv"

# Funcion de completacion
completm <- function(data)
{ fechas <- as.POSIXct(data$date, format = "%Y-%m-%d")
data$date <- fechas
comm <- cutoff(data, method = c("correlation"), corr = "spearman", cutoff = 0.85)
rownames(comm) <- as.factor(data$date)
write.csv(comm,output)
}

# Ejecutar funcion
completm(data)
```