



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

INSTITUTO INTERAMERICANO DE TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DEL AGUA

TESIS

Que para obtener el grado de Máster en Ciencias del Agua

PRESENTA:

YELENA MÉNDEZ TORRES

**DINÁMICA ESPACIO TEMPORAL DEL RÍO AMACUZAC Y SU ZONA
RIPARIA UTILIZANDO IMÁGENES SENTINEL 2**

DIRECTOR DE TESIS:

CARLOS ALBERTO MASTACHI LOZA

CO-DIRECTOR:

MARÍA DE LOURDES RUIZ GÓMEZ

RICARDO ARÉVALO MEJÍA



Diciembre 2021, Toluca, Estado de México

RESUMEN

Los ecosistemas dulceacuícolas se encuentran bajo una pérdida de biodiversidad continúa, debido tanto a factores climáticos como a la actividad humana. México no se encuentra aislado de esto. El río Amacuzac es un ejemplo de ello, el mismo ha sufrido grandes cambios que han afectado a las especies que habitan en el mismo. Mantener un adecuado control sobre sus aguas es una tarea de vital importancia para el país, debido a que el río Amacuzac es considerado como Área Natural Protegida (INEGI, 2000).

En la presente investigación se contó con dos estaciones hidrométricas sobre el río Amacuzac y con las imágenes Sentinel 2 para un periodo entre 2015 y 2021 pertenecientes al área de estudio. Estas fueron procesadas en el programa SNAP, posteriormente se realizaron clasificaciones supervisadas con los algoritmos MaxEnt y SVM, para comparar cuál de los dos lograba reflejar mejor el área de estudio. Con el algoritmo que mejor clasificó el área se realizaron mapas de probabilidad del espejo de agua para tiempos de retornos de 2, 5, 10, 20 años respectivamente y diferentes regímenes de precipitación. Para poder predecir en el futuro el comportamiento de los microhábitats que se dan en el río.

Los resultados más cercanos a la realidad fueron obtenidos de la clasificación a partir del SVM. Con dicha clasificación y los caudales asociados al área, se logró establecer una relación entre los periodos de retornos y las clasificaciones supervisadas para de esta forma obtener la dinámica espacio temporal del espejo de agua del río Amacuzac.

Con el análisis de imágenes de satélites Sentinel 2 a 10m de resolución se logró obtener una buena precisión en la clasificación del río. La comparación entre los algoritmos de clasificación MaxEnt y SVM, permitió explorar desde dos puntos diferentes el comportamiento del río. Los resultados de esta investigación contribuyeron al esclarecimiento de la dinámica que presenta el río Amacuzac al pasar diferentes periodos de tiempo. Finalmente se establecieron los mapas de probabilidad como herramienta concluyente para describir dicha dinámica.

ABSTRACT

Freshwater ecosystems are under continuous loss of biodiversity, due to both climatic factors and human activity. Mexico is not isolated from this. The Amacuzac River is an example of this, it has undergone great changes that have affected the species that inhabit it. Maintaining adequate control over its waters is a task of vital importance for the country, because the Amacuzac river is considered a Protected Natural Area (INEGI, 2000).

In the present investigation, there were two hydrometric stations on the Amacuzac river and Sentinel 2 images for a period between 2015 and 2021 belonging to the study area. These were processed in the SNAP program, later supervised classifications were carried out with the MaxEnt and SVM algorithms, to compare which of the two managed to better reflect the study area. With the algorithm that best classified the area, probability maps of the water mirror were made for return times of 2, 5, 10, 20 years respectively and different precipitation regimes. To be able to predict in the future the behavior of the microhabitats that occur in the river.

The results closest to reality were obtained from the classification from the SVM. With this classification and the flows associated with the area, it was possible to establish a relationship between the return periods and the supervised classifications in order to obtain the spatial-temporal dynamics of the water surface of the Amacuzac river.

With the analysis of images from Sentinel 2 satellites at 10m resolution, it was possible to obtain good precision in the classification of the river. The comparison between the MaxEnt and SVM classification algorithms allowed us to explore the behavior of the river from two different points. The results of this research contributed to the clarification of the dynamics that the Amacuzac river presents when passing different periods of time. Finally, the probability maps were established as a conclusive tool to describe said dynamics.

TABLA DE CONTENIDO

TABLA DE CONTENIDO	1
ÍNDICE DE FIGURAS	3
ÍNDICE DE TABLAS	7
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	8
1.1 Justificación contextual y científica.....	10
1.2 Hipótesis	11
1.3 Objetivo general.....	11
1.4 Objetivos específicos	11
CAPÍTULO 2: GESTIÓN INTEGRADA DE RECURSOS HÍDRICOS, ECOHIDROLOGÍA, CAUDAL ECOLÓGICO Y TELEDETECCIÓN	12
2.1 Gestión Integrada de los Recursos Hídricos y Ecohidrología	12
2.2 Metodologías de caudales ambientales para ríos.....	13
2.3 Caudal ambiental en México	14
2.4 Alteración hidrológica	15
2.5 Teledetección.....	15
2.6 Métodos de clasificación	17
2.7 Respuestas del río a los cambios del caudal	19
CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS	22
3.1 Selección y características del área de estudio	22
3.2 Método.....	24
3.2.1 Recopilación y preprocesamiento de las bases de datos.....	25
3.2.2 Análisis de estaciones hidrométricas	27
3.2.3 Clasificación espacio-temporal del río y zonas riparias	30
3.2.4 Dinámica espacio temporal del río Amacuzac y zonas riparias	34

CAPÍTULO 4: RESULTADOS.....	36
4. 1 Resultados del preprocesamiento de la información	36
4.1.1 Estaciones hidrométricas	36
4.1.2 Imágenes Satelitales.....	39
4.2 Periodos de retornos	43
4.3 Clasificación espacio-temporal del río y zonas riparas	45
4.4 Dinámica espacio temporal del río basada en probabilidades	50
CONCLUSIONES	68
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
ANEXOS	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1.: Hiperplano SVM.	18
Figura 2.2: Biodiversidad acuática y régimen natural de flujo (adaptado de Bunn and Arthington, (2002)).	20
Figura 3.1: Área de estudio general.	22
Figura 3.2: Delimitación del área de estudio específica por cuencas.	23
Figura 3.3: Esquema metodológico.	24
Figura 3.4: Ejemplo de sección del río, (A)Periodo de lluvia, (B) Periodo de seca.	31
Figura 3.5: Ejemplo del procesamiento con MexEnt.	32
Figura 3.6: Ejemplo del procesamiento con SVM.	33
Figura 3.7: Correlación de caudales entre las estaciones hidrométricas.	35
Figura 4.1: (A) Caudales diarios estación 18232, (B) Caudales diarios estación 18232 corregidas, (C) Caudales diarios estación 18437, (D) Caudales diarios estación 18437 corregidas.	37
Figura 4.2: Hydra Eflow análisis de datos, estación 18232.	38
Figura 4.3: Hydra Eflow análisis de datos, estación 18437.	38
Figura 4.4: Alteración hidrológica estación 18232.	39
Figura 4.5: Alteración hidrológica estación 18437.	39
Figura 4.6: (A) Banda TCL sin procesar. (B) Banda TCL procesada en el programa SNAP. Ambas imágenes de fecha 2017/10/14 con resolución de 10m.	41
Figura 4.7: Salida del SNAP, banda SLC con resolución de 20m para la fecha 2017/10/14.	41
Figura 4.8: Ejemplo de procesamiento de nubes, banda SLC con resolución de 20m para la fecha 2019/11/23.	42
Figura 4.9: Representación de la cantidad de píxel faltantes por área.	42
Figura 4.10: Función de mejor ajuste Log-Pearson III, estación 18232.	43

Figura 4.11: Función de mejor ajuste Log-Pearson III, estación 18437	43
Figura 4.12: Ejemplos de polígonos y puntos para el MaxEnt y SVM.	45
Figura 4.13: (a) Clasificación con MaxEnt, (b) Clasificación con SVM, cuenca 1.	46
Figura 4.14: (a) Clasificación con MaxEnt, (b) Clasificación con SVM, cuenca 2.	46
Figura 4.15: (a) Clasificación con MaxEnt, (b) Clasificación con SVM, cuenca 4.	47
Figura 4.16: (a) Clasificación con MaxEnt, (b) Clasificación con SVM, cuenca 5.	47
Figura 4.17: (A) Vista satelital del río. (B) Clasificación con MaxEnt, (C) Clasificación con SVM. Imagen 2017/10/14.....	48
Figura 4.18: Parámetros de calidad de clasificación con MaxEnt obtenidos a partir de matriz de confusión.....	49
Figura 4.19: Valores de AUC de las clasificaciones con SVM y MaxEnt a partir de la curva ROC.	50
Figura 4.20: Mapa de probabilidad de inundación: Cuenca 1 periodo de lluvias, estación 18737, Tr=2 años.	52
Figura 4.21: Mapa de probabilidad de inundación: Cuenca 1 periodo de seca, estación 18737, Tr=2 años.	52
Figura 4.22: Mapa de probabilidad de inundación: Cuenca 2 periodo de lluvia, estación 18737, Tr=2 años.	53
Figura 4.23: Mapa de probabilidad de inundación: Cuenca 2 periodo de seca, estación 18737, Tr=2 años.	53
Figura 4.24: Mapa de probabilidad de inundación: Cuenca 4 periodo de lluvia, estación 18232, Tr=2 años.	54
Figura 4.25: Mapa de probabilidad de inundación: Cuenca 4 periodo de seca, estación 18232, Tr=2 años.	54
Figura 4.26: Mapa de probabilidad de inundación: Cuenca 5 periodo de lluvia, estación 18232, Tr=2 años.	55

Figura 4.27: Mapa de probabilidad de inundación: Cuenca 5 periodo de seca, estación 18232, Tr=2 años.	55
Figura 4.28: Mapa de probabilidad de inundación: Cuenca 1 periodo de lluvia, estación 18437, Tr=5 años.	56
Figura 4.29: Mapa de probabilidad de inundación: Cuenca 1 periodo de seca, estación 18437, Tr=5 años.	56
Figura 4.30: Mapa de probabilidad de inundación: Cuenca 2 periodo de lluvia, estación 18437, Tr=5 años.	57
Figura 4.31: Mapa de probabilidad de inundación: Cuenca 2 periodo de seca, estación 18437, Tr=5 años.	57
Figura 4.32: Mapa de probabilidad de inundación: Cuenca 4 periodo de lluvia, estación 18232, Tr=5 años.	58
Figura 4.33: Mapa de probabilidad de inundación: Cuenca 4 periodo de seca, estación 18232, Tr=5 años.	58
Figura 4.34: Mapa de probabilidad de inundación: Cuenca 5 periodo de lluvia, estación 18232, Tr=5 años.	59
Figura 4.35: Mapa de probabilidad de inundación: Cuenca 5 periodo de seca, estación 18232, Tr=5 años.	59
Figura 4.36: Mapa de probabilidad de inundación: Cuenca 1 periodo de lluvia, estación 18437, Tr=10 años.	60
Figura 4.37: Mapa de probabilidad de inundación: Cuenca 1 periodo de seca, estación 18437, Tr=10 años.	60
Figura 4.38: Mapa de probabilidad de inundación: Cuenca 2 periodo de lluvia, estación 18437, Tr=10 años.	61
Figura 4.39: Mapa de probabilidad de inundación: Cuenca 2 periodo de seca, estación 18437, Tr=10 años.	61
Figura 4.40: Mapa de probabilidad de inundación: Cuenca 4 periodo de lluvia, estación 18232, Tr=10 años.	62

Figura 4.41: Mapa de probabilidad de inundación: Cuenca 4 periodo de seca, estación 18232, Tr=10 años.	62
Figura 4.42: Mapa de probabilidad de inundación: Cuenca 5 periodo de lluvia, estación 18232, Tr=10 años.	63
Figura 4.43: Mapa de probabilidad de inundación: Cuenca 5 periodo de seca, estación 18232, Tr=10 años.	63
Figura 4.44: Mapa de probabilidad de inundación: Cuenca 1 periodo de lluvia, estación 18437, Tr=20 años.	64
Figura 4.45: Mapa de probabilidad de inundación: Cuenca 1 periodo de seca, estación 18437, Tr=20 años.	64
Figura 4.46: Mapa de probabilidad de inundación: Cuenca 2 periodo de lluvia, estación 18437, Tr=20 años.	65
Figura 4.47: Mapa de probabilidad de inundación: Cuenca 2 periodo de seca, estación 18437, Tr=20 años.	65
Figura 4.48: Mapa de probabilidad de inundación: Cuenca 4 periodo de lluvia, estación 18232, Tr=20 años.	66
Figura 4.49: Mapa de probabilidad de inundación: Cuenca 4 periodo de seca, estación 18232, Tr=20 años.	66
Figura 4.50: Mapa de probabilidad de inundación: Cuenca 5 periodo de lluvia, estación 18232, Tr=20 años.	67
Figura 4.51: Mapa de probabilidad de inundación: Cuenca 5 periodo de seca, estación 18232, Tr=20 años.	67

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1: Pruebas no paramétricas para análisis de calidad de datos.....	26
Tabla 3.2: Niveles de la banda SLC.	27
Tabla 3.3: Distribuciones de probabilidad para análisis de frecuencia.....	28
Tabla 3.4: Parámetros de alteración hidrológica.	29
Tabla 3.5: Estado hidrológico definidos a partir de los Índices de Alteración (IAH).	30
Tabla 4.1: Disponibilidad de datos.	40
Tabla 4.2: Resumen de análisis de frecuencia estación 18232.	44
Tabla 4.3: Resumen de análisis de frecuencia estación 18437.	44
Tabla 4.4: Caudales umbrales asociados a los periodos de retorno estación 18232.....	45

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

Es cada vez más evidente que la biodiversidad de los ecosistemas dulceacuícolas, a escala regional y mundial, están en mayor peligro que los sistemas terrestres o marinos. Los ecosistemas de agua dulce ocupan aproximadamente el 0,8% de la superficie de la Tierra, pero albergan casi el 6% de todas las especies conocidas. Por ejemplo, más de 10 000 especies de peces viven en ecosistemas de agua dulce, lo que representa el 40% de las especies de peces conocidas a nivel mundial. Además, los ecosistemas de agua dulce proporcionan bienes y servicios insustituibles para los seres humanos, como agua potable y de riego, alimentos, creación y regulación de microclimas (Xiong et al., 2020).

La construcción de cientos de miles de represas a nivel nacional y mundial, y la extensa transformación humana de la cobertura terrestre han modificado en gran medida la magnitud, el momento y la duración de los caudales de los ríos que históricamente han sostenido ecosistemas fluviales naturalmente dinámicos (Graf, 1999). Contribuyendo a la degradación de muchos de los bienes y servicios naturales que estos ecosistemas brindan a las comunidades humanas (N. Poff and Zimmerman, 2009).

La importancia de mantener ecosistemas saludables para apoyar el bienestar humano en un mundo en que la disponibilidad de recursos hídricos se reduce es ahora ampliamente reconocido (Leemans and De Groot, 2003). Los numerosos beneficios económicos proporcionados a la sociedad humana por el mantenimiento de ecosistemas acuáticos y ribereños saludables, junto con el alto costo y la dificultad de restaurar ecosistemas degradados (Bernhardt et al., 2005), han alimentado la creciente conciencia de que los principios de la ciencia de los ecosistemas deben ser más completos, integrando la planificación y gestión de los recursos hídricos. El diseño deliberado y estratégico de ecosistemas resilientes, incluidas las aguas dulces, ahora se reconoce como un importante desafío científico social del siglo XXI (Palmer et al., 2004).

La gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH) es hoy en día el eje principal de la política hídrica en el mundo y en México. Según el Global Water Partnership (GWP, 2000a), la GIRH es: “Un proceso que promueve el manejo y desarrollo coordinado del agua, la tierra y los recursos relacionados, con el fin de maximizar el bienestar social y económico

resultante de manera equitativa sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas vitales” (Kauffer, 2020).

Para la GIRH la ecohidrología juega un papel fundamental, ya que representa la regulación dual entre el uso de la comprensión de los organismos terrestres y acuáticos, y la adaptación a la calidad y dinámica del agua. Lo cual hace necesario contar con un caudal ecológico en los ríos, para que los administradores del agua integren efectivamente las necesidades humanas y del ecosistema (Arthington et al., 2006). Para llevar a cabo esta tarea se han desarrollado disímiles metodologías, las cuales pueden ser divididas en cuatro grupos importantes: hidrológicas, valoración hidráulica, simulación de hábitat y holísticas (Tharme, 2003) que ayudan a definir los regímenes fluviales.

El régimen fluvial es un determinante primario de la estructura y función de los ecosistemas acuáticos y ribereños para arroyos y ríos. La alteración hidrológica ocasionada por distintos factores (climáticos, antropogénicos, etc.) ha deteriorado los ecosistemas fluviales a escala mundial (Poff et al., 2010) modificando el hábitat de las especies que los habitan (Shi et al., 2019). Por lo que, con la ayuda de índices de alteración hidrológica se puede establecer relaciones de respuestas hábitat-alteración hidrológica (Belmar et al., 2013).

Para mitigar estas amenazas, la gestión eficaz y la formulación de políticas son fundamentales, por lo que se requieren datos precisos sobre la biodiversidad con una alta resolución espacio-temporal. Sin embargo, la mayoría de las prácticas actuales de biomonitoreo todavía se basan en estimaciones puntuales localizadas de la biodiversidad, lo que impide una ampliación adecuada a escalas espacialmente finas (Carraro et al., 2020). Gracias a la apertura de los productos satelitales de alta resolución ha sido posible monitorear la dinámica espacial y temporal de los ecosistemas (Moreno, 2019). Esto también ha hecho factible analizar la respuesta de los ríos y las zonas riparias a los cambios en su régimen fluvial, que genera alteraciones en la diversidad y abundancia de los hábitats que las conforman (Arthington et al., 2006). Debido a lo anterior, el presente trabajo pretende determinar la dinámica del régimen fluvial de un río. Esto permitirá determinar el posible comportamiento en el mismo.

1.1 Justificación contextual y científica

La cuenca del río Balsas es una de las más extensas e importantes de México, biogeográficamente tiene gran relevancia desde el punto de vista de la fauna de peces (Miller et al., 2009). Uno de los principales afluentes del Balsas es el río Amacuzac, el cual está considerado como una de las áreas hidrológicas prioritarias para la conservación biológica en México (CONABIO, 2017). Numerosos ríos en el Estado de Morelos han sufrido degradación ambiental a causa de distintos factores, antrópicos, climáticos e hidrológicos, entre ellos el río Amacuzac es uno de los que mayores afectaciones presenta.

Entre los factores que han afectado al río Amacuzac y a sus zonas riparias se encuentran: el cambio climático, crecimiento poblacional (Archundia et al., 2017), cambio de uso de suelo (Guerra, 2018), crecimiento industrial (Machado, 2017), contaminación de las aguas (Zuzolo et al., 2017), canalización y dragado (INEGI, 2000). Estos cambios han influenciado sobre la estructura y la persistencia de las comunidades bióticas nativas dentro de los ecosistemas fluviales (Shi et al., 2019), provocando problemas ecológicos como reclutamiento fallido, extinción local e invasión exitosa de especies en los ecosistemas de agua dulce (Bunn and Arthington, 2002). Debido a la situación anterior es necesario determinar la dinámica del río Amacuzac y zonas riparias, para implementar estrategias de planeación y conservación del ecosistema.

En este contexto, contar con algoritmos de reconocimientos de patrones que pueden ser utilizados con imágenes satelitales para buscar sitios homogéneos (García et al., 2020), es una opción poderosa para determinar de manera automatizada el comportamiento del río. La unión de estas zonas con datos históricos de caudales puede llevarnos a establecer la dinámica del del río y sus zonas riparias. Sirviendo esto como un instrumento para la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos debido a la importancia hidrológica y biológica que poseen los ecosistemas en la zona.

1.2 Hipótesis

La implementación de algoritmos de clasificación (MaxEnt y SVM) e imágenes Sentinel 2 permitirá determinar la dinámica espacio-temporal del río Amacuzac a través de valores de probabilidad, a fin de contar con un instrumento de gestión ambiental.

1.3 Objetivo general

Establecer la dinámica espacio-temporal del río Amacuzac obtenidas mediante los algoritmos de clasificación; MaxEnt, SVM, e imágenes Sentinel 2 a través de valores de probabilidad, para el desarrollo de un instrumento de gestión ambiental del río.

1.4 Objetivos específicos

- Recopilar, analizar y acondicionar los caudales históricos e imágenes disponibles para generar las bases de datos necesarias.
- Determinar la calidad de los datos hidrométricos y la función de distribución de probabilidad con el mejor ajuste para obtener los períodos de retorno a 2, 5, 10 y 20 años.
- Clasificar las imágenes Sentinel-2 utilizando los algoritmos MaxEnt y SVM para identificar la dinámica espacio-temporal de las zonas con agua, vegetación y arena dentro del río.
- Unificar los periodos de retorno con las clasificaciones para obtener la probabilidad de inundación espacio-temporal del río Amacuzac.

CAPÍTULO 2: GESTIÓN INTEGRADA DE RECURSOS HÍDRICOS, ECOHIDROLOGÍA, CAUDAL ECOLÓGICO Y TELEDETECCIÓN

2.1 Gestión Integrada de los Recursos Hídricos y Ecohidrología

Durante la Conferencia Internacional sobre Agua y Medio Ambiente en Dublín en 1992, reconocida mundialmente por los principios que allí se adoptaron para la gestión integrada de los recursos hídricos, surgió la ecohidrología como una nueva ciencia. Su nombre surge de la fusión de los términos “hidrología” y “ecología”. Esta propone una nueva metodología de enfoque multidisciplinaria para una gestión sustentable y de largo plazo de los recursos hídricos (Martínez y Villalejo, 2020).

Para abordar la problemática mundial del uso excesivo de los recursos hídricos y el deterioro de los ecosistemas acuáticos, se utilizan los caudales ambientales como una herramienta ecohidrológica de la GIRH. Actualmente, se reconocen a los caudales ambientales como esenciales para la salud de los ecosistemas y el bienestar humano, lo que ha sido mundialmente reconocido a través de la Conferencia de Brisbane, realizada en Australia en 2007. La aplicación de caudales ambientales requiere de un involucramiento social, un marco institucional y normativo, así como de políticas claras y efectivas para su implementación.

Los caudales ambientales como herramienta de la GIRH aportan elementos para responder a algunas de las preguntas que surgen al abordar el uso sustentable de los recursos hídricos. Según la UICN (International Union for the Protection of Nature), el caudal ambiental es el régimen hídrico que se da en un río, humedal o zona costera para mantener ecosistemas y sus beneficios donde existen usos del agua que compiten entre sí y donde los caudales se regulan. Los caudales ambientales contribuyen de manera decisiva a la salud de los ríos, al desarrollo económico y a aliviar la pobreza; garantizan la disponibilidad constante de los muchos beneficios que aportan a la sociedad los ríos y los sistemas de aguas subterráneas sanos.

Esta herramienta, además, contribuye a lograr las condiciones para generar una adecuada implementación de la normativa, debido a que requiere de acuerdos entre usuarios y de instancias de participación social. El desafío de determinar cuánto del régimen hidrológico puede ser alterado sin comprometer la salud y los servicios de los ecosistemas implica

establecer límites de sustentabilidad en un marco de decisión tanto socio-político como científico (Tharme, 2003).

2.2 Metodologías de caudales ambientales para ríos

Hasta el momento existen unas 207 metodologías distintas en 44 países alrededor del mundo (Tharme, 2003), que se dividen en metodología hidrológicas, de valoración hidráulica, de simulación de hábitat y holísticas (Heredia et al., 2006). Estas nos ayudan a definir los regímenes de flujo que se presentan en nuestros ríos, la implementación de estas varía teniendo en cuenta el país, los datos necesarios para su desarrollo, el tiempo con el que se cuenta, los resultados que se quieran obtener y el fondo económico disponible.

Metodologías hidrológicas: Son los métodos más simples y económicos que existen para determinar el caudal ecológico. Comúnmente son referidos como métodos de gabinete, se basan principalmente en análisis estadísticos de registros históricos de estaciones hidrométricas; es decir, en mediciones de caudal (Korsgaard, 2007). Esta metodología se fundamenta en la relación estricta que existe entre el régimen hidrológico y el ecosistema existente, puesto que las especies dentro del río se han adaptado y acostumbrado a las variaciones de caudal. El método más utilizado dentro de esta metodología es el de método de Tennant o Método de Montana (Tennant, 1976), también se encuentran algunos como el método de Hoppe (Hoppe, 1975), método de Arkansas (Filipek et al., 1987), entre otros.

Metodologías hidráulicas: Esta metodología usa relaciones entre el caudal del río y alguna característica del cauce (velocidad, profundidad, perímetro mojado, entre otros). Es una mejora de la metodología hidrológica, que involucra medidas específicas del cauce afectadas directamente por la variación de caudal y que constituyen un factor limitante para las especies piscícolas u otras especies (Heredia et al., 2006). Dentro de esta metodología los métodos más utilizados son el Método del Perímetro Mojado (Reiser et al., 1989) y el Método de Múltiples Transeptos (Arthington y Zalucki, 1998) .

Metodologías de simulación de hábitat: Las metodologías basadas en la simulación del hábitat integran hidráulica y biología para predecir cambios en la calidad y cantidad de hábitat, simulando así la dinámica fluvial (Da Costa et al., 2015). La información requerida en esta metodología es moderadamente alta e incluye series históricas de caudal, variables hidráulicas de múltiples secciones transversales e información de disponibilidad de hábitat

de varias especies de la biota acuática (Heredia et al., 2006). Dentro de los métodos más utilizados se encuentran el *Physical Habitat Simulation Model* [PHABSIM] y *Riberine Habitat Simulation Model* [RHABSIM] (Bovee, 1986).

Metodologías holísticas: Estas metodologías comprenden estudios hidrológicos, hidráulicos, modelos de simulación de hábitat e hidroquímicos. Debido a la amplia variedad de estudios realizados, estos métodos proporcionan una perspectiva más grande de las condiciones del hábitat con una mayor precisión en la estimación del caudal ecológico ((Brown y King, 2003). Entre los métodos más conocidos se encuentra el *Instream Flow Incremental Methodology* (IFIM) (Bovee, 1982), y el *Downstream Response to Imposed Flow Transformation* (DRIFT) ((King et al., 2003), (King et al., 2014); (Lokgariwar et al., 2014)), entre otros.

2.3 Caudal ambiental en México

En México para la determinación del caudal ecológico se utiliza la norma mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012, la cual establece el procedimiento para la determinación del caudal ecológico en cuencas hidrológicas, y se basa en las normas NOM-011-CONAGUA-2000 y NOM-059-SEMARNAT-2010. En esta el caudal ecológico se define como la cantidad, calidad y variación del gasto reservado para preservar servicios ambientales, componentes, funciones, procesos y la resiliencia de ecosistemas acuáticos y terrestres que dependen de procesos hidrológicos, geomorfológicos, ecológicos y sociales (DOF, 2012).

Existen escasas publicaciones en México que estén enfocadas en la cuantificación del caudal ecológico, aunque estén hechas con metodologías distintas. Ejemplo es: Villela y Tarabay, (2007) emplearon tres tipos metodológicos en el río Santiago. (Mora et al., 2009)) evaluaron el caudal ecológico (determinación holística) en las cuencas de bajo impacto Copalita-Zimatán-Coyula, Oaxaca. De la Lanza et al., (2015) efectuaron el cálculo para el río Piaxtla Sinaloa (determinación hidrológica). Así como la propuesta de caudal ecológico de distribución mensual, utilizando los métodos hidrológicos e hidrobiológico para la cuenca del Río Ayuquila-Armería por Mesa et al., (2017). Sin embargo, tomando en consideración las 720 cuencas principales de México y las 189 cuencas pertenecientes al Programa Nacional de Reservas de Agua, se requiere hacer un esfuerzo de incluir el mayor número de evaluaciones para determinar el caudal ecológico (de la Lanza et al., 2018).

2.4 Alteración hidrológica

Para realizar una correcta gestión de los ríos, es necesario conocer en qué situación se encuentran los aspectos del régimen de caudales más relevantes desde el punto de vista ambiental. Sólo desde ese conocimiento es posible formular diagnósticos adecuados sobre los cuales cimentar políticas de uso y gestión que permitan avanzar hacia el objetivo del “buen estado ecológico”. Esto permite evaluar si las características del régimen en un río han sido modificadas y sienta las bases para trazar algún plan estratégico de GIRH para la recuperación y/o rehabilitación de los cuerpos de agua (Speed et al., 2011).

Para determinar la alteración hidrológica se analiza información de datos hidrométricos y de obras de regulación de caudal para clasificar las series hidrométricas en Régimen Hidrológico Natural (RHN) (previo a la aparición de alteraciones) y Régimen Hidrológico Alterado (RHA) (Mejía, 2018). De esta forma, se establece la línea base de los componentes del régimen natural (variabilidad, magnitud, frecuencia, duración, estacionalidad y tasa de cambio). Así mismo, se conforma el sustento hidrológico que se traduce como el motor para cualquier modelo de regionalización de caudal ecológico (King et al., 2014).

La evaluación de las condiciones del régimen puede realizarse a través de cualquier Índice de Alteración Hidrológica (IAH) (Poff et al., 1997), a menudo se emplean los IAHs desarrollados por, Martínez y Fernández, (2006), ya que resumen los parámetros propuestos por Olden y Poff, (2003) y por Richter et al., (1996) en 21 IAHs parciales y 3 IAHs globales, correspondientes al régimen de caudales mínimos, caudales habituales y caudales máximos (Mejía, 2018). En México también es muy utilizados los IAH de la NMX-AA-159-SCFI-2012 que determina el régimen de volúmenes de agua de manera mensual y anual en estado natural y actual (DOF, 2012).

2.5 Teledetección

Las primeras experiencias de teledetección se remontan hacia el año 1859 (Chuvieco, 2008), esta se puede definir ampliamente como la recopilación e interpretación de información sobre un objeto, área o evento sin estar en contacto físico con el objeto. Las aeronaves y los satélites son las plataformas comunes para la percepción remota de la tierra y sus recursos naturales (Sanderson, 1982). La capacidad de la teledetección para identificar y monitorear las superficies terrestres y las condiciones ambientales se han expandido enormemente en los

últimos años y los datos de teledetección son una herramienta esencial en el manejo de los recursos naturales.

Hasta hace poco, los datos de observación de la Tierra de los satélites solo estaban disponibles para algunas naciones, y la distribución de datos era limitada y estrictamente regulada. Sin embargo, en la actualidad existe un creciente mercado internacional de información geoespacial y teledetección comercial de alta resolución. Los satélites de observación de la Tierra llevan instrumentos que realizan mediciones remotas desde el espacio para mostrar lo que está sucediendo en la Tierra. Estos datos se recopilan y almacenan antes de ser procesados, interpretados y difundidos (Roy et al., 2014).

Actualmente, se han podido desarrollar grandes avances en el campo de la investigación y de los conocimientos acerca de nuestros recursos naturales, gracias a satélites como Landsat y Sentinel. Con estas tecnologías es posible determinar hábitats de peces dentro de los lagos (King et al., 1999). Las imágenes de teledetección Landsat han sido utilizadas para explorar la fluctuación histórica del área del agua de los lagos y para obtener niveles de agua históricos basados en la elevación del límite del agua integrado con la batimetría.

Mientras que Immitzer et al., (2016) utilizó las imágenes Sentinel 2 para mapear por primera vez en Europa Central, los tipos de cultivos y las especies arbóreas. Otros muchos trabajos se han desarrollado gracias a las imágenes satelitales, como el de Kilcoyne et al., (2018) que utilizó las imágenes Sentinel 1 y Sentinel 2 para producir mapas detallados del hábitat derivados de imágenes satelitales. Así como Immordino et al., (2019) utilizó las Sentinel 2 para mapear a gran escala los hábitats más sensibles y de alto valor como son corales, pastos marinos y manglares.

Recientemente gracias a la disponibilidad de imágenes de satélite, se ha estado integrando el análisis de estas como soporte a las metodologías para la determinación de los caudales ambientales. Estudios recientes revelan su uso como apoyo para determinar el régimen de los ríos (Tanaka et al., 2019), la forma de los ríos (Dewan et al., 2017) , el cambio de uso de suelo (Colak et al., 2019), (Shirmohammadi et al., 2020) y, monitoreo de la calidad del agua (Petus et al., 2019; Tu et al., 2018).

2.6 Métodos de clasificación

La clasificación de imágenes es un proceso que consiste en agrupar los píxeles de una imagen en un número finito de clases, basándose en los valores espectrales de las distintas bandas, convirtiendo de este modo la información captada por los sensores como niveles digitales a una escala categórica fácil de interpretar (Mather y Tso, 2009). Los píxeles que pertenezcan a la misma clase deberán tener unas características espectrales similares (Schowengerdt, 1985). Los algoritmos de clasificación de imágenes son una de las técnicas más importantes utilizadas en el ámbito de la teledetección, ya que facilitan la interpretación de una gran cantidad de información contenida en sus bandas.

Las imágenes satelitales han sido utilizadas con algoritmos de reconocimiento de patrones que realizan clasificación de zonas homogéneas de una-clase o multi-clase. La clasificación de una-clase es un tipo de clasificación en el que tan solo se pueden asignar dos clases diferentes (0 o 1), mientras que en la multi-clase se pueden asignar múltiples categorías a las observaciones. Dentro de los algoritmos que trabajan con una clasificación de zona homogénea de una-clase a través de imágenes de satélite se pueden encontrar el SVM (*Support Vector Machine*) (Hernandez y Cobo, 2007; Yarlagadda et al., 2018) y el MaxEnt (Li y Guo, 2010; Liu et al., 2018), para la clasificación multi-clase podemos citar algunos como el algoritmo Random Forest (Li et al., 2013; Thanh y Kappas, 2018) y el KNN (*K-Nearest-Neighbor*) (Prasetyo et al., 2018; Cecotti & Jha, 2018) entre otros.

El paquete MaxEnt (*Maximum Entropy*) (Phillips et al. 2006) es particularmente popular en la distribución de especies / modelado de nichos ambientales. MaxEnt toma una lista de ubicaciones de presencia de especies como entrada y un conjunto de predictores ambientales (por ejemplo, precipitación, temperatura) en un paisaje definido por el usuario que se divide en celdas de cuadrícula. De este panorama, MaxEnt extrae una muestra de ubicaciones de fondo que contrasta con las ubicaciones de presencia. Este generalmente supera a otros métodos basados en la precisión predictiva y es particularmente fácil de usar. Los usuarios de MaxEnt deben tomar una serie de decisiones sobre cómo deben seleccionar sus datos de entrada y elegir entre una amplia variedad de configuraciones para construir modelos a partir de estos datos.

Las SVM son un conjunto de algoritmos de aprendizaje automático desarrollados por (Cortes y Vapnik, 1995) y su equipo AT&T, que se puede utilizar para desafíos de clasificación o regresión. Estos son métodos que están propiamente relacionados con problemas de clasificación y regresión. Su buen desempeño ha llevado a su uso en una gran variedad de problemas, algunos investigadores (Espinosa, et al 2014, Carcedo et al. 2017, Castañeda y Davila, 2019), han utilizado SVM para solucionar problemas de clasificación y regresión relacionados a la predicción de series de tiempo y clasificación de imágenes, mostrando tener muy buenos resultados en comparación a otras metodologías.

En el algoritmo SVM, se traza cada elemento de dato como un punto en el espacio n-dimensional (donde n es un número de características que tiene) con el valor de cada característica siendo el valor de una coordenada particular. Luego, realiza la clasificación encontrando el hiperplano que diferencia muy bien las dos clases (ver figura 2.1). Los vectores de soporte son simplemente las coordenadas de la observación individual. El clasificador SVM es una frontera que mejor segrega las dos clases (hiperplano / línea).

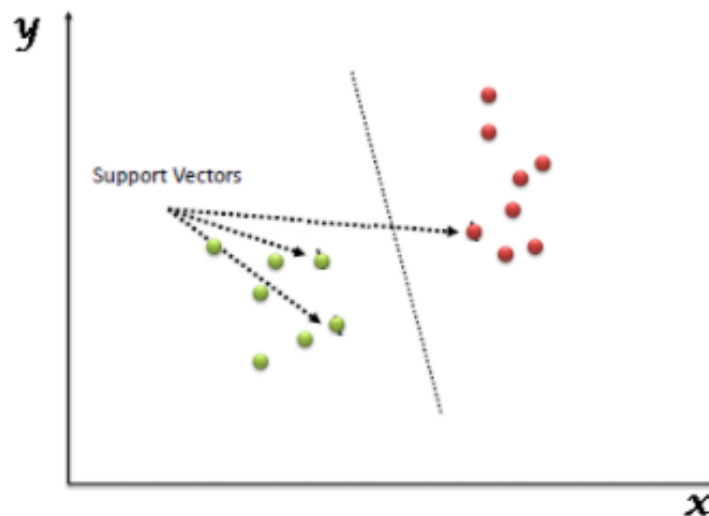


Figura 2.1.: Hiperplano SVM.

La construcción de las SVM se basa en la idea de transformar o proyectar un conjunto de datos pertenecientes a una dimensión n dada, hacia un espacio de dimensión superior aplicando una función Kernel–Kernel Trick (Alpaydin, 2010) para que a partir del nuevo espacio creado, se operen los datos como si se tratase de un problema de tipo lineal, resolviendo el problema sin considerar la dimensionalidad de los datos (Alpaydin, 2010).

Dado un conjunto de ejemplos de entrenamiento (de muestras) podemos etiquetar las clases y entrenar una SVM para construir un modelo que prediga la clase de una nueva muestra.

Ambas técnicas de aprendizaje automático de máquina de vectores de soporte (SVM) y entropía máxima (MaxEnt) son adecuadas para modelar la idoneidad del hábitat de las especies. Varios estudios realizan comparaciones entre ambos algoritmos para encontrar el más idóneo a la hora de clasificar, incluso comparan estos con otros algoritmos, sin embargo no se ha mostrado la supremacía de uno sobre otro (Mack & Waske, 2017), (Pratiwi & Widodo, 2017), (Chen et al. 2017), (Rahimian et al. 2019), (Farrell et al. 2019).

2.7 Respuestas del río a los cambios del caudal

El cambio climático y las actividades antropogénicas conducen colectivamente a una alteración del régimen de flujo, que ejerce una gran influencia sobre la estructura y la persistencia de las comunidades bióticas nativas dentro de los ecosistemas fluviales (Shi et al., 2019). La alteración del régimen de flujo provoca la aparición de problemas ecológicos, como el reclutamiento fallido, extinción local y la invasión exitosa de especies exóticas (Bunn and Arthington, 2002; N. Poff L. and Zimmerman, 2009).

De acuerdo con Bunn y Arthington, (2002) se pueden encontrar 4 principios básicos que vinculan el régimen fluvial y la biodiversidad acuática (Figura 1) y se desglosan a continuación:

Principio 1: El régimen fluvial natural de un río influye en la biodiversidad acuática a través de varios mecanismos interrelacionados que operan sobre diferentes escalas espaciales y temporales. La relación entre la biodiversidad y la naturaleza física del hábitat acuático es probable que sea impulsado principalmente por grandes eventos que influyen en la forma y tamaño del canal.

Principio 2: Las sequías y los caudales bajos juegan un papel al limitar la disponibilidad general del hábitat. Muchas características del régimen de flujo influyen en los patrones de historia de vida, especialmente la estacionalidad y previsibilidad del patrón general, pero también el momento de un flujo de eventos particulares.

Principio 3: Algunos eventos de flujo desencadenan la dispersión longitudinal de organismos acuáticos migratorios y otros eventos grandes, lo que permite el acceso a hábitats de llanura de inundación desconectados.

Principio 4: La biota nativa ha evolucionado en respuesta al régimen de flujo general. El cambio en el uso de la tierra de la cuenca y el desarrollo asociado de los recursos hídricos inevitablemente conducen a cambios en uno o más aspectos del régimen de flujo que resultan en la disminución de la biodiversidad acuática a través de estos mecanismos. Las invasiones introducidas o las especies exóticas tienen más probabilidades de tener éxito a expensas de la biota nativa si las primeras se adaptan al régimen de flujo modificado.

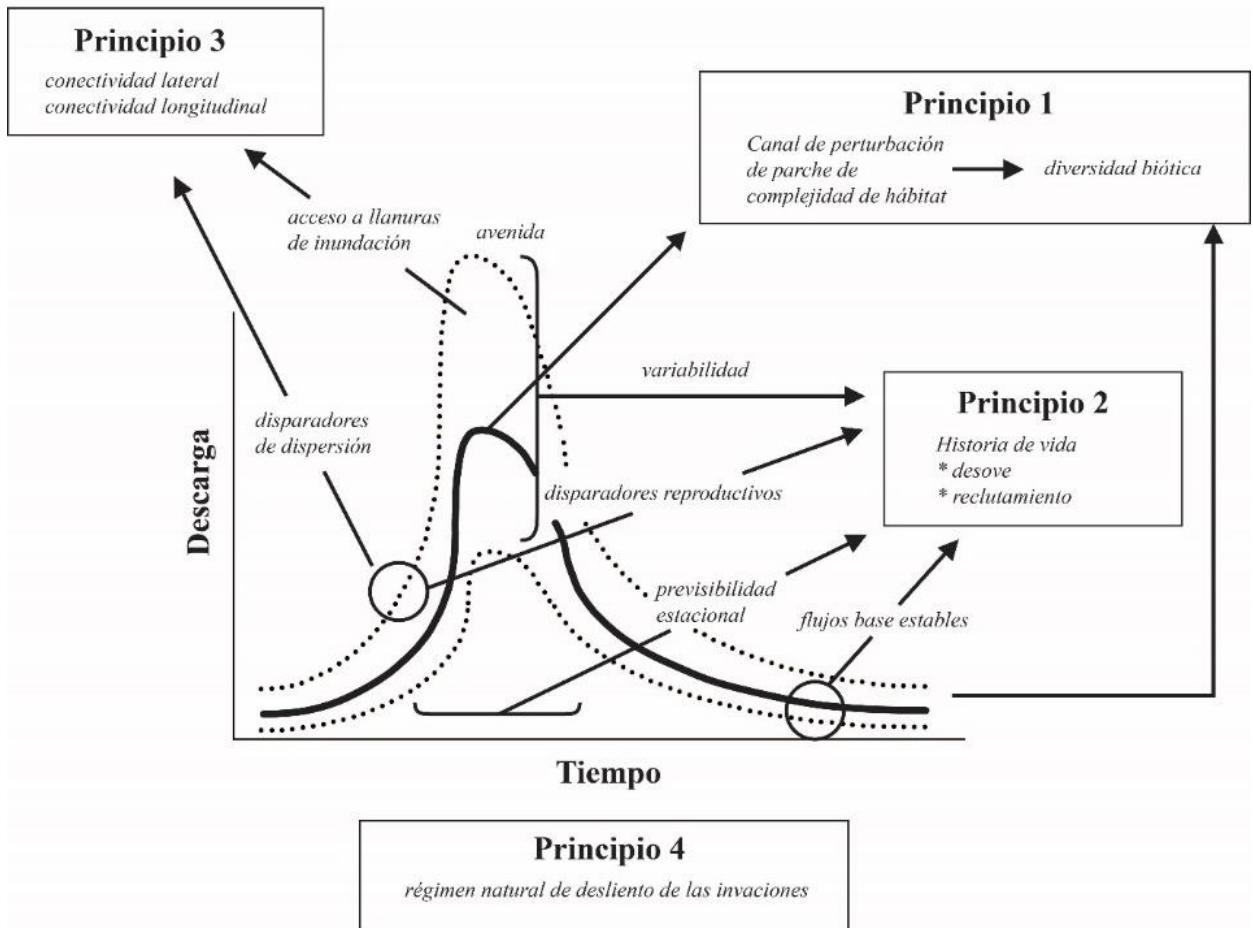


Figura 2.2: Biodiversidad acuática y régimen natural de flujo (adaptado de Bunn and Arthington, (2002)).

El reconocimiento de los principios anteriores trae consigo una serie de consecuencias para el río como; **la influencia que va a tener el caudal en el hábitat**, donde el movimiento del agua a través del paisaje influye en la ecología de los ríos a través de una amplia gama de escalas espaciales y temporales. A su vez, la forma y el tamaño de los canales del río, la distribución de hábitats de rabiones y charcas, y la estabilidad del sustrato está determinada en gran medida por la interacción entre el régimen fluvial, la geología local y la forma de relieve. Las variaciones sutiles en el caudal y las velocidades cercanas al lecho pueden dictar

la distribución y abundancia de especies particulares de plantas y animales por ejemplo (Sparks, 1995; Newbury y Gaboury, 1993; Wetmore et al., 1990).

Otra de las consecuencias que se presentan es la **influencia del flujo y el hábitat en las plantas acuáticas**, en la cual la variación espacial y temporal en la estructura del ensamblaje de la planta está influenciada por inundaciones y socavaciones, desecación, estabilidad del sustrato y variaciones localizadas en la velocidad del agua, la turbulencia y el esfuerzo cortante (Chambers et al., 1991). Así como también la **influencia del flujo y el hábitat en invertebrados acuáticos**, los cuales en ríos con sustratos inestables tienden a caracterizarse por una baja diversidad de especies, y la biota presente a menudo tiene historia de vida o comportamiento característicos de ambientes frecuentemente perturbados; y los cambios bruscos de flujo afectan grandemente a los macroinvertebrados (Cobb et al., 1992).

Otra de las consecuencias que cabe resaltar es la **influencia del flujo y el hábitat en los peces**, donde muchas especies de peces muestran preferencia por tipos particulares de hábitat, como rabiones y charcas o zonas de remanso. La riqueza de la fauna a menudo aumenta a medida que aumenta la complejidad del hábitat, siendo la profundidad, la velocidad y la cobertura las variables más importantes que rigen esta relación. La estructura del ensamblaje de peces (es decir, composición taxonómica y patrón de abundancia relativa) también está fuertemente relacionada con la estructura del hábitat (Pusey et al., 2000; Felley y Felley, 1987; (Meffe and Sheldon, 1988).

CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Selección y características del área de estudio

Para la selección del área de estudio se tuvieron en cuenta algunos de los puntos de interés seleccionados por Mejía (2012), en los cuales se han encontrado alteraciones en el ecosistema (presencia de especies exóticas). Teniendo en cuenta estos puntos se seleccionaron las estaciones hidrométricas más cercanas, dando como resultado que solo dos de estas tenían datos actualizados. Luego se delimitaron las cuencas hidrográficas de cada estación 18232 (estación al sur) y 18437 (en el cierre de la cuenca), y se determinó como área de estudio general la formada a partir de la estación hidrométrica 18437 que se puede observar en la figura 3.1.

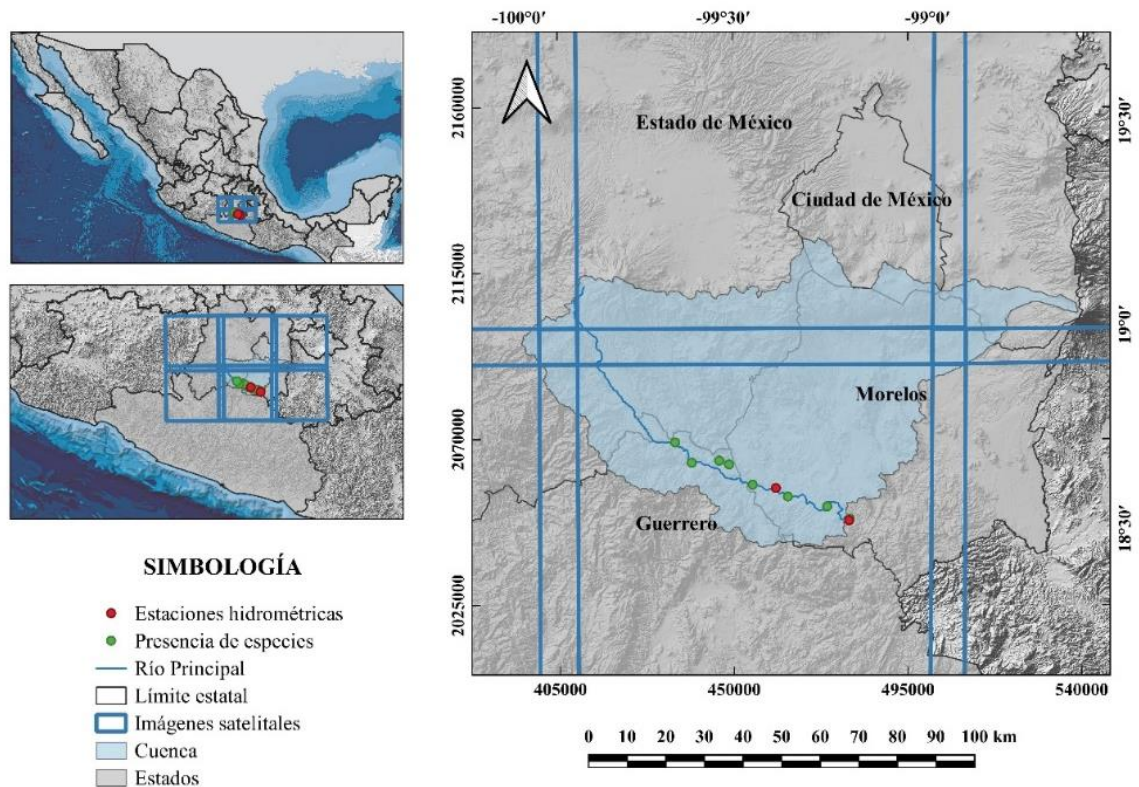


Figura 3.1: Área de estudio general.

La zona de estudio en general se encuentra ubicada en la región hidrológica número 18, perteneciente a la cuenca del río Balsas y abarca una superficie aproximada de 6012 km². Comprende parte de los estados de Morelos, Guerrero, Estado de México y Ciudad México; geográficamente se localiza entre los paralelos 18°27' y 19°14' de latitud norte y los meridianos -98°37' y -100°00' de longitud oeste. Se encuentra delimitada por las siguientes

regiones y cuencas hidrológicas: al Norte por las Regiones Hidrológicas números 26 Pánuco y 12 Lerma-Santiago; al Sur por la cuenca hidrológica Río Bajo Atoyac; al Oeste por las cuencas hidrológicas Río Cutzamala y Río Medio Balsas; y al Este por la cuenca hidrológica Río Nexapa (INEGI, 2000).

El clima, en términos generales es cálido subhúmedo con lluvias en verano y con temperatura media anual superior a 22°C (García, 1998). Esta zona semiárida tiene una marcada estacionalidad donde la temporada de lluvias se extiende desde el mes de junio hasta principios de octubre, y la precipitación va de los 800 a los 1,000 mm anuales. Los tipos de vegetación dominantes en las riberas del río son la selva baja caducifolia y bosque de galería. El Río Amacuzac, bajo múltiples criterios, se ha considerado como área prioritaria de conservación y algunas partes de sus riberas se encuentran dentro de Áreas Naturales Protegidas (Torres et al., 2016).

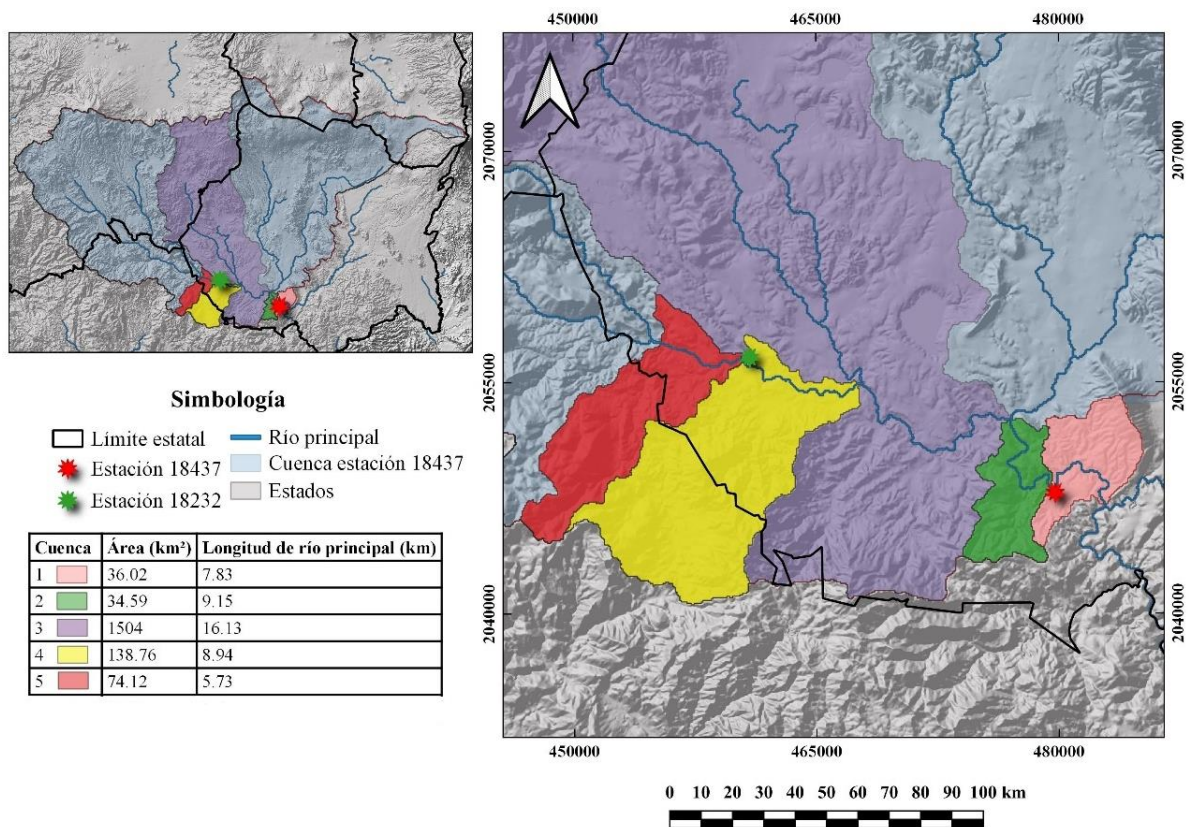


Figura 3.2: Delimitación del área de estudio específica por cuencas.

Analizando el área general y las estaciones hidrométricas se detectó que no hay suficientes estaciones para estudiar toda el área que esta comprende, por lo que se determinó seleccionar pequeñas subcuencas aledañas a las estaciones en las cuales se conoce el caudal que circula

(suponiendo la hipótesis que el caudal no cambia hasta que aparece un aporte significativo). Las cuencas seleccionadas se muestran en la figura 3.2, y son las que corresponde con los índices 1, 2 ,4 y 5, quedando exenta la cuenca número 3, ya que como se observa tiene un aporte significativo y no hay estaciones hidrométricas cercana que permitan conocer su caudal.

3.2 Método

Para lograr el cumplimiento de los objetivos planteados en la investigación, el desarrollo metodológico se dividió en actividades secuencialmente lógicas (Figura 3.3) que permitieron establecer las características que determinan la dinámica espacio-temporal del río Amacuzac.

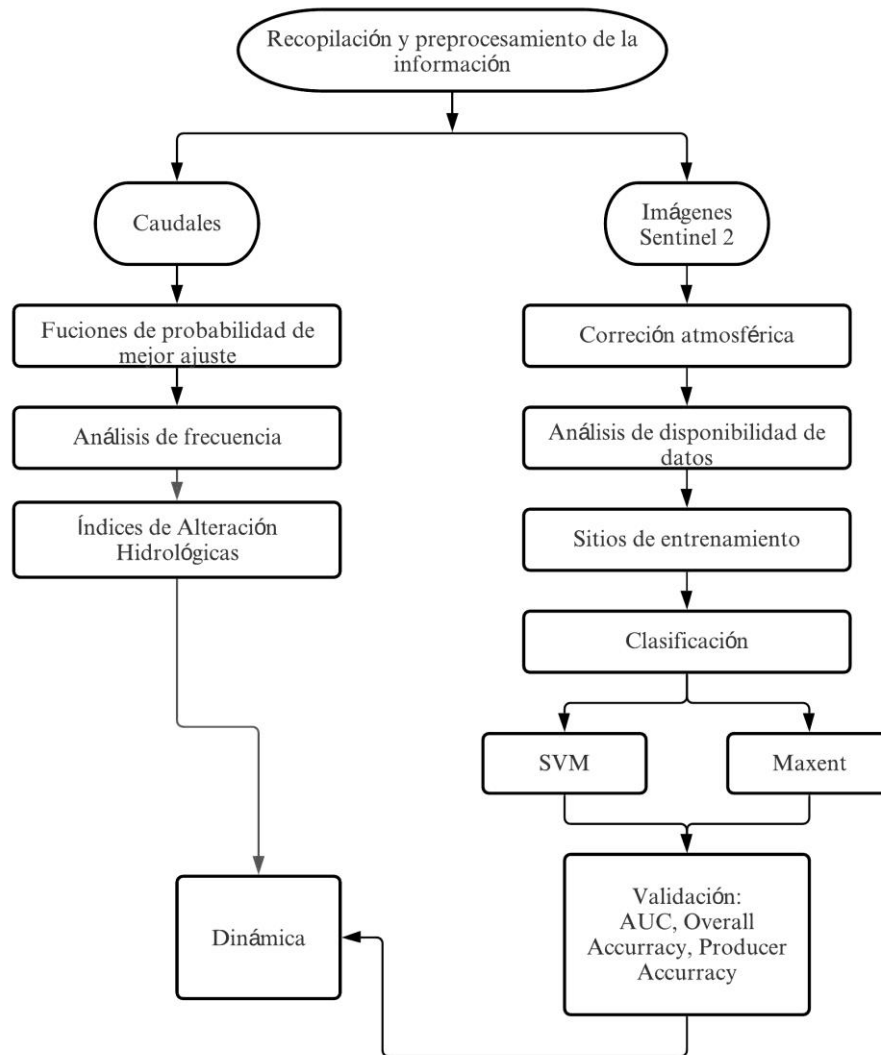


Figura 3.3: Esquema metodológico.

3.2.1 Recopilación y preprocesamiento de las bases de datos

Consistió en la recopilación y análisis de la de información disponible en diversas fuentes y escalas, para su posterior procesamiento. A continuación, se listan las fuentes que se consultaron:

-El modelo digital de elevaciones (DEM) se obtuvo de *Consultative Group on International Agricultural Research Consortium for Spatial Information* (CGIAR-CSI) disponible en <http://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/> en formato GoeTiff (.tif) con resolución de 30 m.

-Los datos de las estaciones hidrométricas se obtuvieron del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) disponible en (<http://www.conagua.gob.mx>) y su actualización mediante solicitud a los correspondientes organismos de cuenca, en formato de valores separados por comas (.csv) con una frecuencia diaria, para el periodo de 1950 a 2020.

-Se llevó a cabo la descarga de imágenes satelitales Sentinel 2 disponible libremente a través de (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>) en formato GoeTiff (.tif) con resolución de 10 a 60 m, para un período de junio del 2015 a diciembre del 2020.

Inicialmente se llevaron a cabo trabajos de gabinete para estructurar la información recopilada en la actividad previa, y crear las bases de datos necesarias en las actividades posteriores. La información procesada fue los datos de las estaciones hidrométricas e imágenes satelitales.

Estaciones hidrométricas

Al procesar las series de caudales diarios históricos de ambas estaciones (18232 y 18437) en el Hydra-Eflow (Arévalo, 2018), se encontraron varias inconsistencias por lo que se decidió corregir las series. Luego se realizó el análisis de caudales diarios de las estaciones para ambas estaciones. En este punto se realizaron pruebas de calidad de datos, como pruebas de homogeneidad se comprobaron las pruebas de Hatacana, Mann-Whitney y la prueba de Iteración. Al igual se comprobó la independencia de datos con las pruebas de Inversión, Correlación ordenada y Wald-Wolfowitz. Además, se aplicó la prueba de Normalidad y la prueba de valores atípicos de Grubbs y Becks (ver tabla resumen 3.1).

Tabla 3.1: Pruebas no paramétricas para análisis de calidad de datos

Aspecto de descarga	Nombre del test	Estimador estadístico
Homogeneidad	Hatacana	Normal
	Iteración	Test
	Mann-Whitney	Normal
Independencia		Normal
		t student
		Normal
Normalidad		Normal
Otros		Test

Imágenes Satelitales

Una vez procesados los caudales se pasó a realizar la corrección atmosférica y geométrica de las imágenes satelitales obtenidas. Antes, fueron filtradas descartando aquellas que tenían una alta presencia de nubes sobre el área de estudio y aquellas en las que el satélite no tomó la imagen correctamente. La corrección atmosférica se realizó en el programa SNAP (*Sentinels Application Platform*) versión 7.0 con el modelo Sen2cor, disponibles gratuitamente en la página oficial de la ESA (*The European Space Agency*). Con Sen2Cor se pasaron las imágenes del nivel de producto 1C de manera íntegra sin ser adulterado al 2A. Aquí se trabajó en la corrección atmosférica de los datos de entrada de Nivel 1C de la parte superior de la atmósfera.

Las salidas de Nivel 2A fueron; BOA (*Bottom-Of Atmosphere*), opcionalmente imágenes de reflectancia corregidas por terreno y nubes (cirros), mapas AOT (*Aereosol Optical Thickness*), WVP (*Water Vapour*), SLC (*Scene Classification*) e indicadores de calidad, incluidas las probabilidades de nubes y nieve. El producto de salida fue de imágenes JPEG, con tres resoluciones diferentes, 60, 20 y 10 m.

Con el Sistema de Información Geográfica QGIS versión 3.14 se continuó con el análisis. Primeramente, se seleccionó la banda SCL a 20 m (tabla 3.2) y se procedió a la eliminación de las zonas con nubes. Aquí fueron seleccionados los niveles de salida 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 como los niveles sin errores en la calidad. Finalmente se sumaron todas las imágenes de la

banda SCL, para determinar los píxeles en los que no se presentaba suficiente información. Para conformar este, se trabajó en áreas donde la omisión de información no fuera mayor a 5 píxeles contiguos. De esta forma, se aseguró que la disponibilidad de información fuese mayor al 95 % de la cobertura de la imagen satelital. Creando así una máscara general para no cometer errores al momento de seleccionar los sitios de entrenamiento para realizar la clasificación supervisada con los algoritmos seleccionados.

Tabla 3.2: Niveles de la banda SLC.

Nivel	Clasificación
0	Sin dato
1	Saturado o defectuoso
2	Píxeles de área oscura
3	Sombras de nube
4	Vegetación
5	No vegetación
6	Agua
7	Desclasificado
8	Probabilidad media de nube
9	Probabilidad alta de nube
10	Cirro delgado
11	Nieve

Por otro lado, se procedió al delineado del río y se realizó un buffer a 50 m, para tener en cuenta gran parte de las riberas del río ya que este en su parte más ancha tiene una distancia de 60 m. Luego cada una de las bandas de interés B2, B3, B4 y B8 fueron corregidas por su propia banda SLC con las correcciones mencionadas anteriormente, con el objetivo de eliminar las zonas sin información del análisis.

3.2.2 Análisis de estaciones hidrométricas

Con el fin de determinar los periodos de retornos (T_r), asociados a cada uno de los caudales correspondientes a las imágenes, se buscó la función de probabilidad de mejor ajuste. Esta fue seleccionada con la ayuda del software Hydra-Eflow (Arévalo, 2018) entre las funciones Log-Normal, Gumbel, Pearson y Log-Pearson III (tabla 3.3). Una vez obtenida la función de mejor ajuste se realizó un análisis de frecuencia para ambas estaciones. Cabe resaltar que a

pesar de tener disponibilidad de datos desde el año 1950, este análisis se realizó a partir de 1970, año que se registra como periodo de regulación de ambas estaciones. Finalmente fueron obtenidos los periodos de retornos correspondientes.

$$p = \frac{i}{n + 1}$$

Donde: i es el rango de datos cuando se ordenan los ascendentes y n el tamaño de la muestra.

Posteriormente dichos periodos de retorno fueron divididos en 4 grupos, periodos de retorno con correspondencia de 2, 5, 10 y 20 años. Esto con el objetivo de poder crear una imagen resumen que fuese representativa de cada uno de los grupos para periodos de lluvia y de seca. Dicho análisis fue realizado para ambas estaciones. Por lo que quedaron conformados para la estación 18232 periodos de retorno de 2, 5, 10 y 20 años, así como para la estación 18437.

Tabla 3.3: Distribuciones de probabilidad para análisis de frecuencia.

Distribución	pdf y Kt	Parámetros
Lognormal	$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(y-\mu_y)^2}{2\sigma_y^2}\right) \quad \forall x > 0$ $K_T = \frac{\exp\left(\kappa \cdot (\ln(1+c_v^2))^{\frac{1}{2}} - \left(\frac{\ln(1+c_v^2)}{2}\right)\right) - 1}{C_v}$	$y = \ln(x)$ $\mu_y = \bar{x}_y$ $\sigma_y = s_y$
Pearson III	$f(x) = \frac{1}{|\alpha|\Gamma(\beta)} \left(\frac{x-x_0}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp\left(-\frac{x-x_0}{\alpha}\right)$ $K_T \approx z + (z^2 - 1) \frac{C_s}{6} + \frac{1}{3} (z^3 - 6z) \left(\frac{C_s}{6}\right)^2 - (z^2 - 1) \left(\frac{C_s}{6}\right)^3 + z \left(\frac{C_s}{6}\right)^4 + \frac{1}{3} \left(\frac{C_s}{6}\right)^5$	$\alpha = s \left(\frac{C_s}{2}\right)$ $\beta = \left(\frac{2}{C_s}\right)$ $x_0 = \bar{x} - \alpha\beta$
Log-Pearson III	$f(x) = \frac{1}{|\alpha|\Gamma(\beta)} \left(\frac{\ln(x) - y_0}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp\left(-\frac{\ln(x)-y_0}{\alpha}\right)$ $K_T \approx z + (z^2 - 1) \frac{C_s}{6} + \frac{1}{3} (z^3 - 6z) \left(\frac{C_s}{6}\right)^2 - (z^2 - 1) \left(\frac{C_s}{6}\right)^3 + z \left(\frac{C_s}{6}\right)^4 + \frac{1}{3} \left(\frac{C_s}{6}\right)^5$	$y = \ln(x)$ $\alpha = s_y \left(\frac{C_s}{2}\right)$ $\beta = \left(\frac{2}{C_s}\right)$ $y_0 = \bar{y} - \alpha\beta$
Gumbel I	$f(x) = \frac{1}{\alpha} \exp\left(-\frac{x-\beta}{\alpha} - \exp\left(-\frac{x-\beta}{\alpha}\right)\right) \quad \forall -\infty < x < \infty$ $K_T = -\frac{\sqrt{6}}{\pi} \left(0.5772 + \ln\left(\ln\left(\frac{T_r}{T_r - 1}\right)\right)\right)$	$\alpha = \frac{\sqrt{6}}{\pi} s$ $\beta = \bar{x} - 0.5772\alpha$






Alteración hidrológica

Para la evaluación de la alteración hidrológica se utilizaron los Índices de Alteración Hidrológica (IAH), definidos generalmente, como cociente entre el valor del parámetro en régimen alterado y el valor en régimen natural. Se proponen 21 índices (6 para valores habituales, 8 para avenidas y 7 para sequías). Cada grupo es resumido por un índice global. La evaluación es cuantitativa y presenta una scorecard para la clasificación del resultado final (tabla 3.4 y 3.5).

Tabla 3.4: Parámetros de alteración hidrológica.

ID	Identificación del parámetro
IAH 1	Magnitud de las aportaciones anuales
IAH 2	Magnitud de las aportaciones mensuales
IAH 3	Variabilidad habitual
IAH 4	Variabilidad extrema
IAH 5	Estacionalidad de máximos
IAH 6	Estacionalidad de mínimos
IAH 7	Magnitud de las avenidas máximas
IAH 8	Magnitud del Caudal Generador del Lecho
IAH 9	Magnitud del Caudal de conectividad
IAH 10	Magnitud de las avenidas habituales
IAH 11	Variabilidad de las avenidas máximas
IAH 12	Variabilidad de las avenidas habituales
IAH 13	Duración de avenidas
IAH 14	Estacionalidad de avenidas (12 valores, uno para cada mes)
IAH 15	Magnitud de las sequías extremas
IAH 16	Magnitud de las sequías habituales
IAH 17	Variabilidad de las sequías extremas
IAH 18	Variabilidad de las sequías habituales
IAH 19	Duración de sequías
IAH 20	Nº de días con caudal nulo (12 valores, uno para cada mes)
IAH 21	Estacionalidad de sequías (12 valores, uno para cada mes)

Tabla 3.5: Estado hidrológico definidos a partir de los Índices de Alteración (IAH).

Color	Estado hidrológico	Valor IAH		Significado
		Parcial	Global	
	Excelente	]0.8, 1.0]	]0.64, 1.00]	Condiciones de referencia
	Bueno	]0.6, 0.8]	]0.36, 0.64]	Ligeramente desviado de las condiciones de referencia
	Medio	]0.4, 0.6]	]0.16, 0.36]	Moderadamente desviado de las condiciones de referencia
	Pobre	]0.2, 0.4]	]0.04, 0.16]	Caudal alterado
	Degradado	]0.0, 0.2]	]0.00, 0.04]	Caudal altamente alterado

Todos los índices, para homogeneizar y facilitar su interpretación, presentan valores acotados entre cero y uno, siendo el cero indicativo de alteración máxima y uno de ausencia de alteración, estableciéndose cinco niveles o Estatus Hidrológicos distribuidos linealmente en ese rango. Para realizar dicho análisis fue utilizado el programa Hydra-Eflow.

3.2.3 Clasificación espacio-temporal del río y zonas riparias

Para determinar los sitios de entrenamiento se determinó la cantidad de pixeles representativos de las imágenes, haciendo uso de la herramienta online Raosoft (<http://www.raosoft.com/samplesize.html>). Esta herramienta utiliza el tamaño total de una población para estimar a través de ciertos parámetros una muestra representativa de la población. En nuestro caso la población corresponde al total de pixeles de la imagen y la muestra, la cantidad de pixeles representativos de esta. El valor obtenido representa el número mínimo de pixeles que se tomaran en cada imagen para determinar los sitios de entrenamiento.

Para los sitios de entrenamiento se decidió utilizar 3 clases que se distribuyeron entre los pixeles anteriormente determinados. Las clases para la clasificación fueron arena, vegetación y río. Para seleccionar los sitios de entrenamiento de la arena y asegurar que permanecieran bajo la misma condición durante toda la serie de imágenes, se tomaron imágenes que correspondiesen entre los meses de noviembre a abril, periodo de lluvias. En el caso contrario para la vegetación y el río se seleccionaron las imágenes entre los meses de mayo a octubre que corresponde al periodo de seca (figura 3.4). De esta forma se garantiza que siempre los pixeles seleccionados correspondan a la misma clase, aunque cambie la fecha de toma de la imagen.

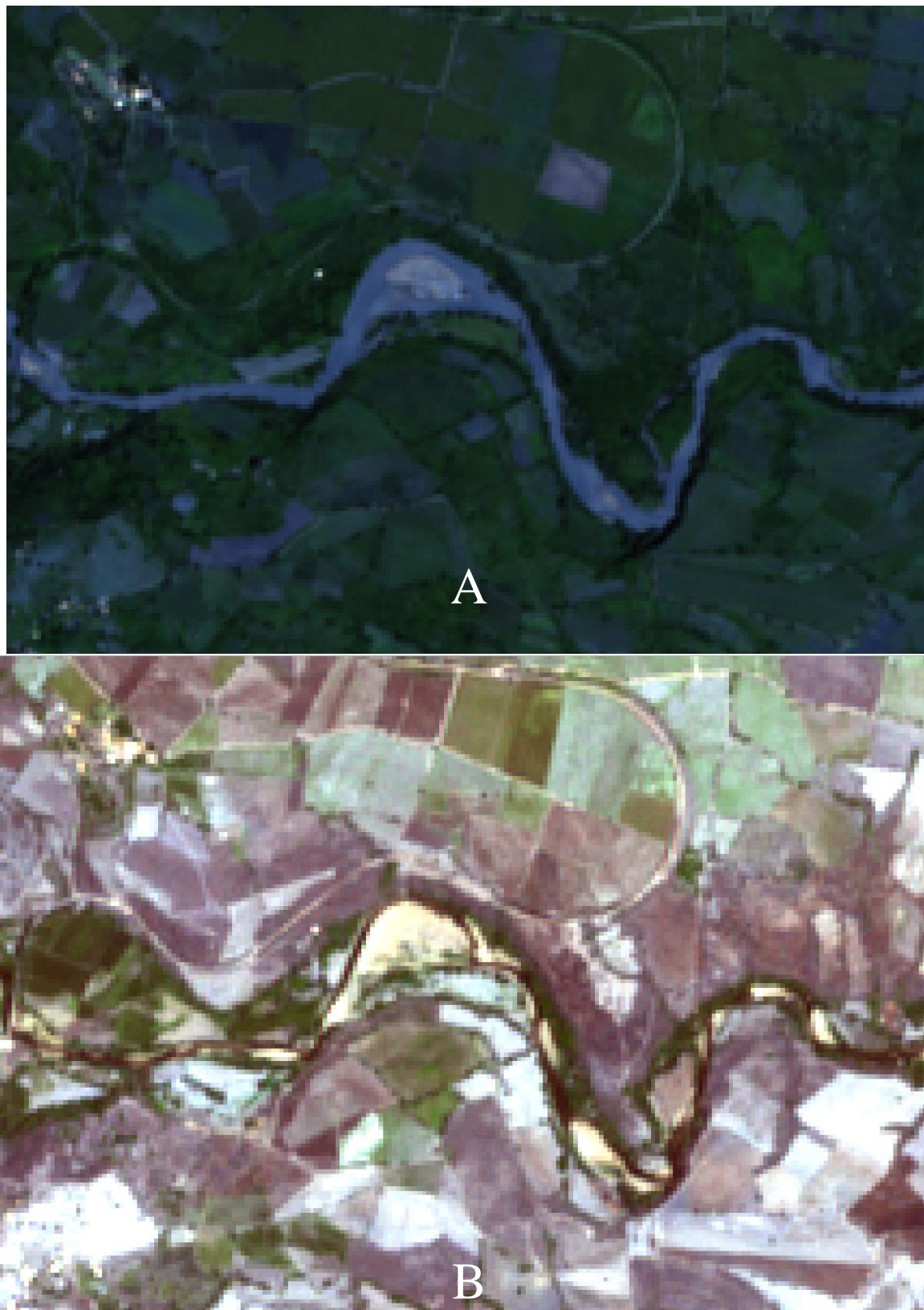


Figura 3.4: Ejemplo de sección del río, (A)Periodo de lluvia, (B) Periodo de seca.

Las clasificaciones supervisadas por imagen se realizaron con el algoritmo MaxEnt versión 3.3.3k (Phillips et al. 2006) y el algoritmo de clasificación SVM en QGIS. Para llevar a cabo estas clasificaciones se necesitó determinar los sitios de entrenamiento en función del valor mínimo determinados de los píxeles que representan la muestra de la imagen y la condición de permanencia de la clase en función del tiempo.

El algoritmo MaxEnt fue seleccionado para realizar la clasificación supervisada teniendo en cuenta las clases de interés (arena, vegetación y río). Fueron introducidas las clases como datos de presencia y como variables explicativas las bandas B2, B3, B4 y B8 con una resolución de 10m (figura 3.5).

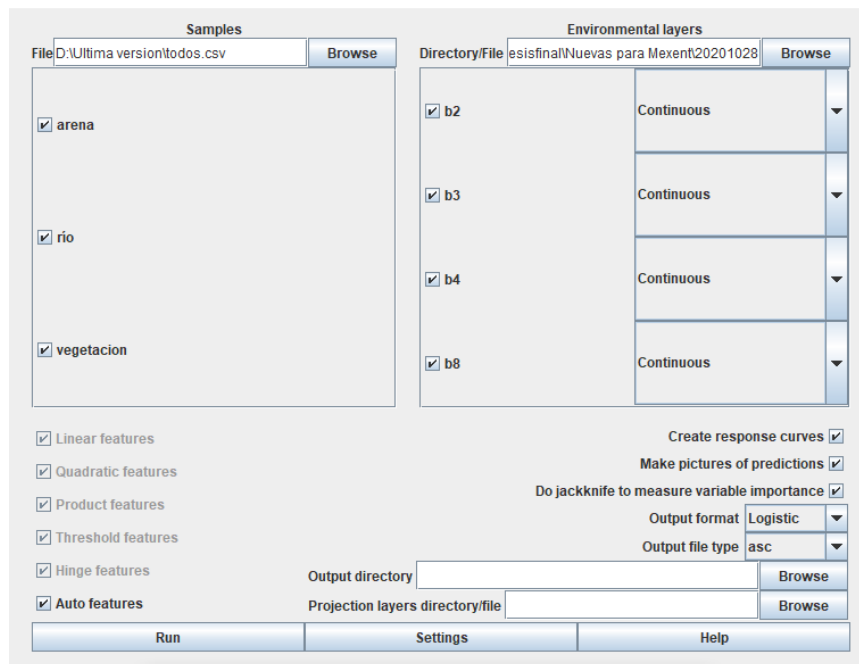


Figura 3.5: Ejemplo del procesamiento con MaxEnt.

Como resultado de la ejecución del MaxEnt se obtienen mapas independientes para cada una de las clases. Los píxeles de cada uno de estos mapas están compuestos por valores de 0 a 1, que representan la probabilidad de encontrar la clase de la imagen. Para una mejor comprensión entiéndase: si en un píxel se encuentra el valor de 1 significa que es 100 por ciento seguro que el píxel corresponde a la clase que representa esa imagen, por el contrario, si se encuentra el valor de 0 significa que hay 0 por ciento de probabilidad de que se encuentre ese píxel la clase.

Como cada una de las imágenes de salida del MaxEnt representa una clase diferente, se requirió integrar las 3 imágenes de salida. Para ello se determinó que se evaluaría en un mismo píxel cada una de las imágenes y seleccionaría la clase (arena, vegetación o río) que tuviera de mayor probabilidad. Con estos pixeles de mayor probabilidad se creó el mapa final de clasificación con la ayuda de un script en Python.

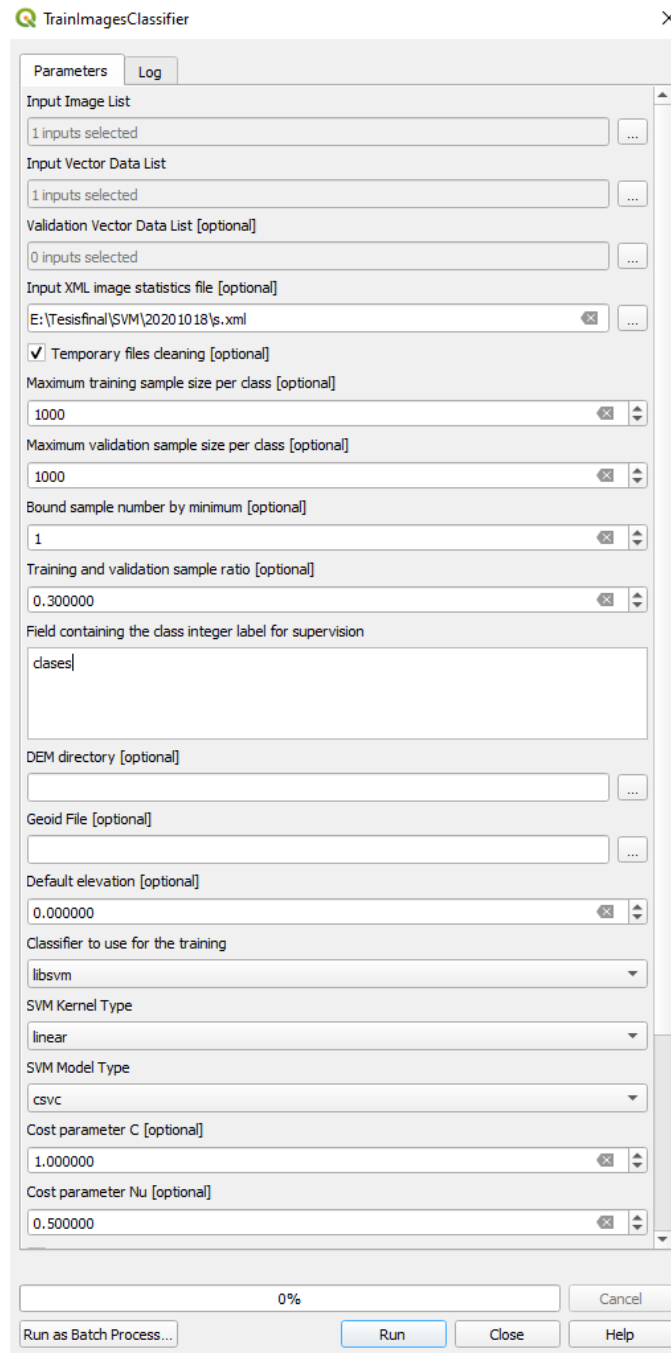


Figura 3.6: Ejemplo del procesamiento con SVM.

Como algoritmo de clasificación también fue utilizado el SVM de la caja de herramientas de Orfeo 6.7.0 en QGIS. Se le dio como entrada la unión de las bandas B2, B3, B4, B8 y los sitios de entrenamiento en forma de polígonos (Gualtieri, 2009) (figura 3.6). Con la ejecución del algoritmo se obtuvo el mapa de clasificación para cada una de las imágenes.

Para realizar la validación de ambos modelos se crearon puntos de control en donde se conocía exactamente qué clase le correspondía a cada uno, y diferentes a los sitios de entrenamiento. Vale la pena aclarar que esta validación se debía haber realizado directamente en campo, pero debido a la contingencia con el COVID-19 fue imposible visitar el área de estudio por lo que se utilizó el Google Earth y el Streetview.

Con la ayuda de un código en Python se validó la precisión en la clasificación de ambos algoritmos, para comparar entre los puntos seleccionados y cada una de las clasificaciones arrojadas por ambos algoritmos. A partir de estas fueron creadas las Matrices de Confusión de la cual se obtuvieron los valores de *Overall Accuracy* (Stehman, 1997) y *Producer's Accuracy* (Congalton, 1991). Además, se crearon las curvas ROC y se obtuvieron los valores de AUC. Con ello se pudo determinar el algoritmo que clasificaba mejor el área de estudio.

3.2.4 Dinámica espacio temporal del río Amacuzac y zonas riparias

Las imágenes clasificadas fueron convertidas a formato xlsx tomando cada píxel y la clasificación para este. Todas las imágenes clasificadas de igual periodo de retorno fueron agrupadas para posteriormente ser analizadas en conjunto. Con la ayuda de Excel se calculó la probabilidad de que en cada píxel en todas las imágenes de un grupo perteneciera a la clase río. Con estas probabilidades se obtiene una imagen para cada grupo que representa la existencia de la clase río. Este análisis se dividió en periodos de lluvias y secas para ver el comportamiento del río en diferentes periodos.

Además, fue creado el río base. Para este se sumaron todas las imágenes sin tener en cuenta el periodo de retorno, y se determinó igualmente la probabilidad de que cada uno fuese río. La imagen genera fue reclasificada indicando que se quedaran solamente los pixeles que tenían un valor mayor al 85 % de probabilidad de siempre ser río, este porcentaje se definió debido a la falta de datos ocasionado por las nubes en algunas imágenes.

Este análisis fue realizado para ambas estaciones, ya que los caudales correspondientes a la estación 18232 representan mejor los que corresponde a la parte sur de la zona de estudio y

la estación 18437 a la parte norte. Conformando así el mapa general de la dinámica del río Amacuzac a partir de probabilidades, a través de las clasificaciones de Imágenes Sentinel 2 y los caudales históricos.

El figura 3.7 indica la correlación de los caudales entre la estación 18232 y 18437. Como la estación 18437 se encuentra aguas debajo de la estación 18232 se entienda que en esta debe haber un mayor caudal debido a los escurrimientos en la cuenca. La gráfica muestra que existen inconsistencia en cuanto a este planteamiento pues se observa valores que están inversamente correlacionados. Esto se puede deber a un error humano a la hora de tomar los datos, o que hay alguna fuente de extracción puntual.

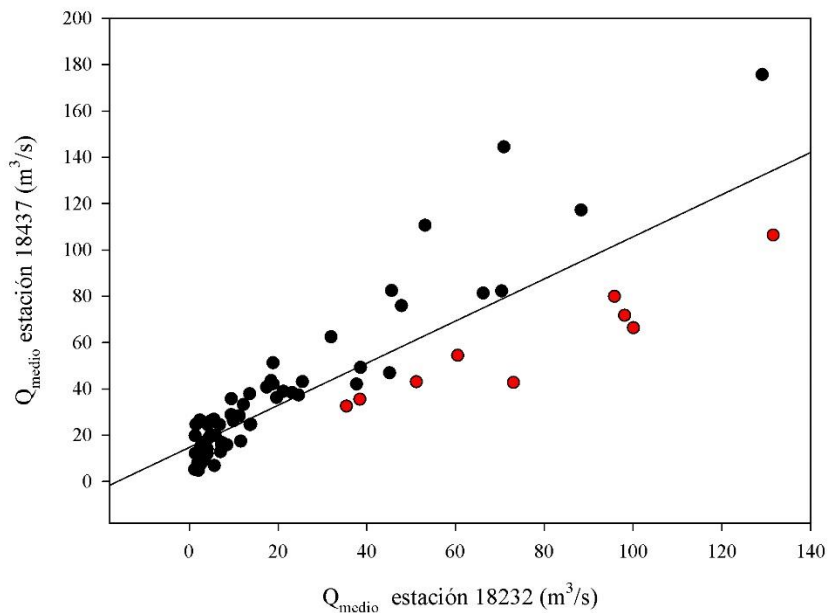


Figura 3.7: Correlación de caudales entre las estaciones hidrométricas.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS

4.1 Resultados del preprocesamiento de la información

Una vez recopilada la de información disponible en diversas fuentes y de haber realizado los trabajos de gabinete, se procedió a estructurar la información. La información preprocesada fueron los datos de las estaciones hidrométricas e imágenes satelitales como se describen a continuación.

4.1.1 Estaciones hidrométricas

Al procesar las series de caudales diarios históricos de ambas estaciones (18232 y 18437) en el programa Hydra-Eflow, se encontraron varias inconsistencias (figura 4.1, A y B). Se detectó que en las series había valores de caudales de más de $1500\text{m}^3/\text{s}$ llegando hasta valores de $123000\text{m}^3/\text{s}$ en ocasiones. Estos elevados valores se le atribuye a un error humano. En la estación 18232 eran 25 valores y en la estación 18437, 35 valores, de un aproximado de 24000 datos en cada estación, por lo cual se decidió eliminarlos de la serie (figura 4.1 C y D).

En cuanto al análisis de calidad de datos, las pruebas de homogeneidad para la estación 18232 arrojaron que la serie no es homogénea en todos los casos. Mientras que para la estación 18437 el método de Hatacana fue el único que arrojó que la serie era homogénea. Esto se puede atribuir a una reubicación de estaciones hidrométricas, medición, cambio de escala, u obras de regulación cerca de la estación, etc.

En cuanto a las pruebas de independencias en la estación 18232 los dos primeros métodos arrojaron una tendencia en la serie de datos. Para la estación 18437 solo el de Correlación Ordenada arrojó que hay una tendencia dentro de la serie temporal de datos. Para ambas estaciones la prueba de Normalidad mostró que la muestra no proviene de una distribución normal. En la prueba de Grubbs y Becks para la estación 18232 quedó el rango de 0.3 a 415 y para la 18437 de 4.1 a 229, por lo que todos los valores fuera de estos rangos se consideran atípicos. En las figuras 4.2 y 4.3 se puede observar los resultados de la ejecución del programa Hydra-Eflow.

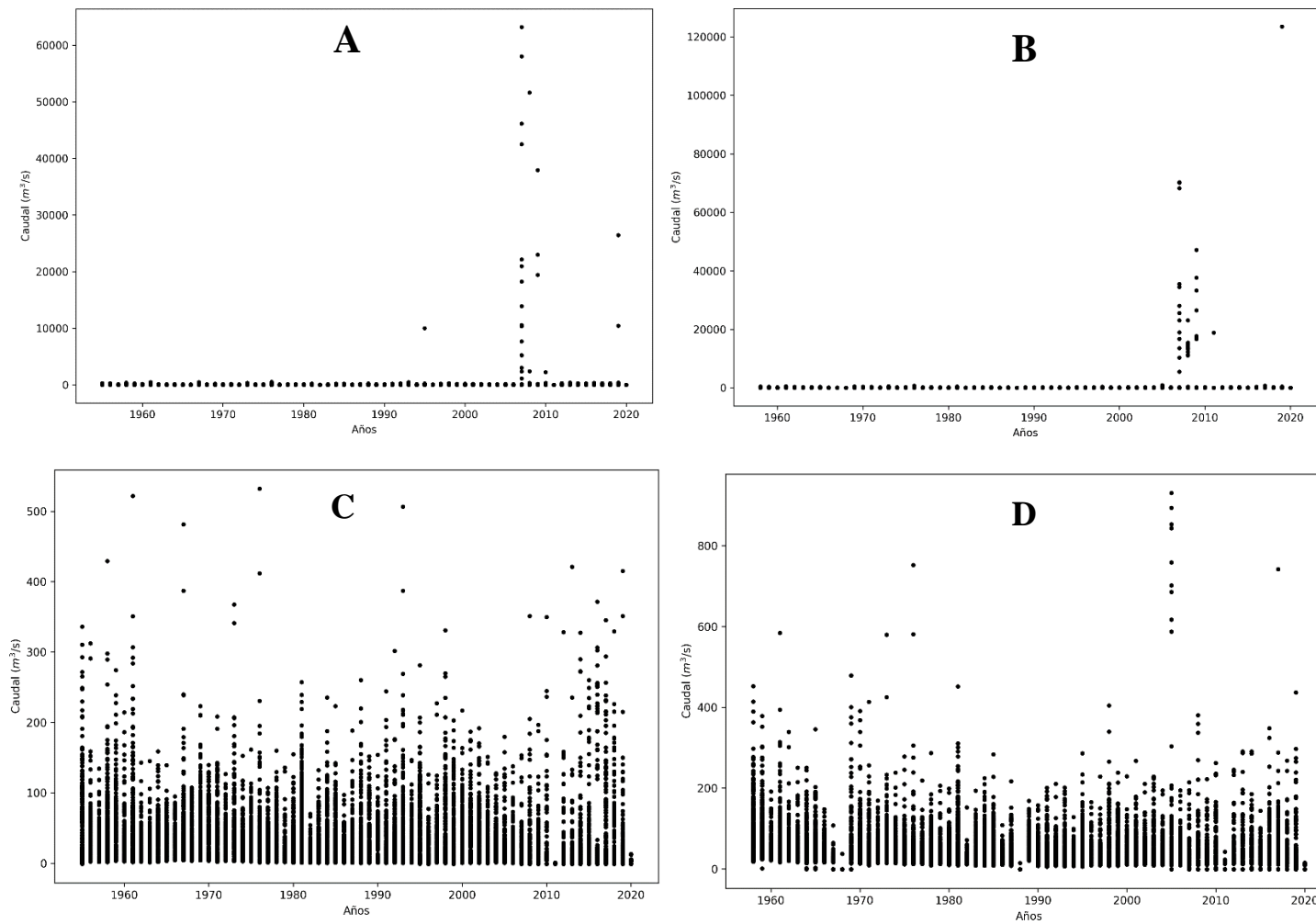


Figura 4.1: (A) Caudales diarios estación 18232, (B) Caudales diarios estación 18232 corregidas, (C) Caudales diarios estación 18437, (D) Caudales diarios estación 18437 corregidas.

Aspect	Test	Estimators			R		
Homogeneity	Hatanaca	-1.96	<=	0.00	<=	1.96	Green
	Mann-Whitney	-1.96	<=	-6.44	<=	1.96	Red
	Iteration	-1.96	<=	-18.05	<=	1.96	Red
Independence	Orderly correlation			4.14	<=	1.65	Red
	Inversion			15789	<=	15081	Red
	Wald-Wolfowitz	-1.96	<=	17.31	<=	1.96	Red
Normality	Normality	-1.96	<=	19.67	<=	1.96	Red
Outliers	Grubbs & Becks	0.3				416.3	Green

Figura 4.2: Hydra Eflow análisis de datos, estación 18232.

Aspect	Test	Estimators			R		
Homogeneity	Hatanaca	-1.96	<=	-4.54	<=	1.96	Red
	Mann-Whitney	-1.96	<=	-7.27	<=	1.96	Red
	Iteration	-1.96	<=	-17.36	<=	1.96	Red
Independence	Orderly correlation			3.48	<=	1.65	Red
	Inversion			14349	<=	13827	Red
	Wald-Wolfowitz	-1.96	<=	16.24	<=	1.96	Red
Normality	Normality	-1.96	<=	23.54	<=	1.96	Red
Outliers	Grubbs & Becks	3.9				229.5	Green

Figura 4.3: Hydra Eflow análisis de datos, estación 18437.

Alteración hidrológica

En ambas estaciones el análisis de alteración hidrológica se reportó como alterado (ver figuras 4.4 y 4.5). Los valores de IAH9 (Índice de magnitud de caudal de conectividad), dieron alterados para ambas estaciones, indicando que el caudal de conectividad está fuertemente ligado con el seccionamiento longitudinal o transversal del río. Esto puede favorecer la intrusión de vegetación al cauce del río y/o aislamiento de comunidades de peces, así como intrusión de especies exóticas. Para la estación 18232 se portó alterado el valor de IAH 15 (Índice de magnitud de las sequías extremas) indicando la alteración de las sequias correspondientes al régimen alterado y al régimen natural.

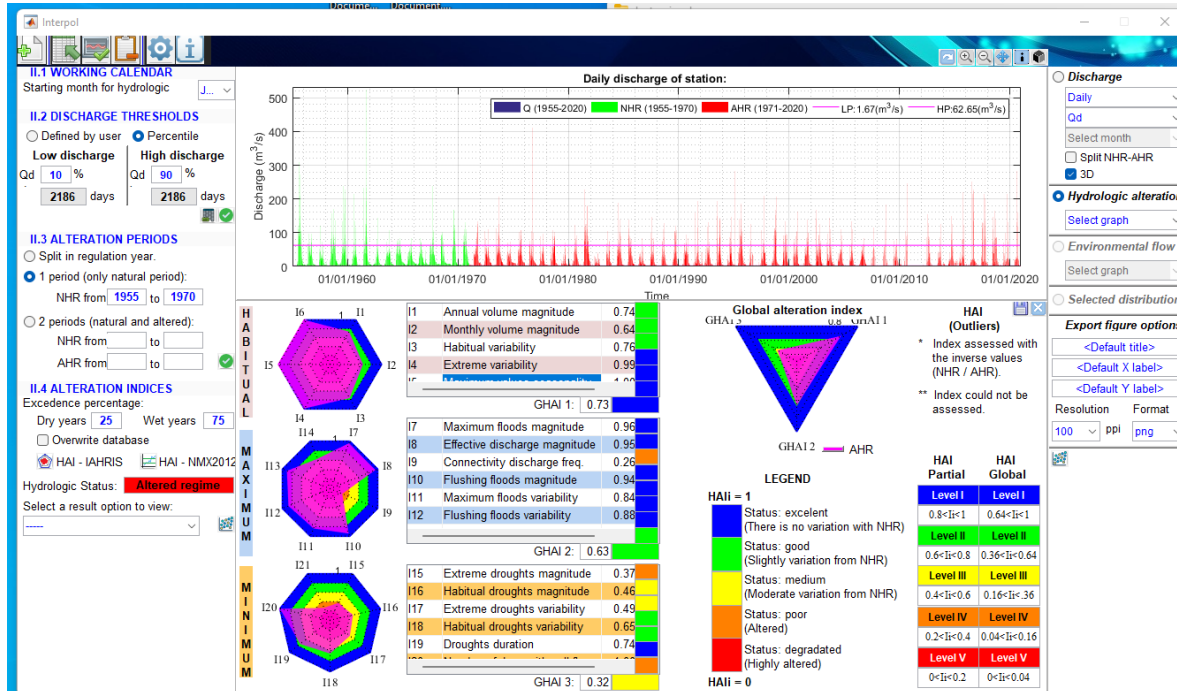


Figura 4.4: Alteración hidrológica estación 18232.

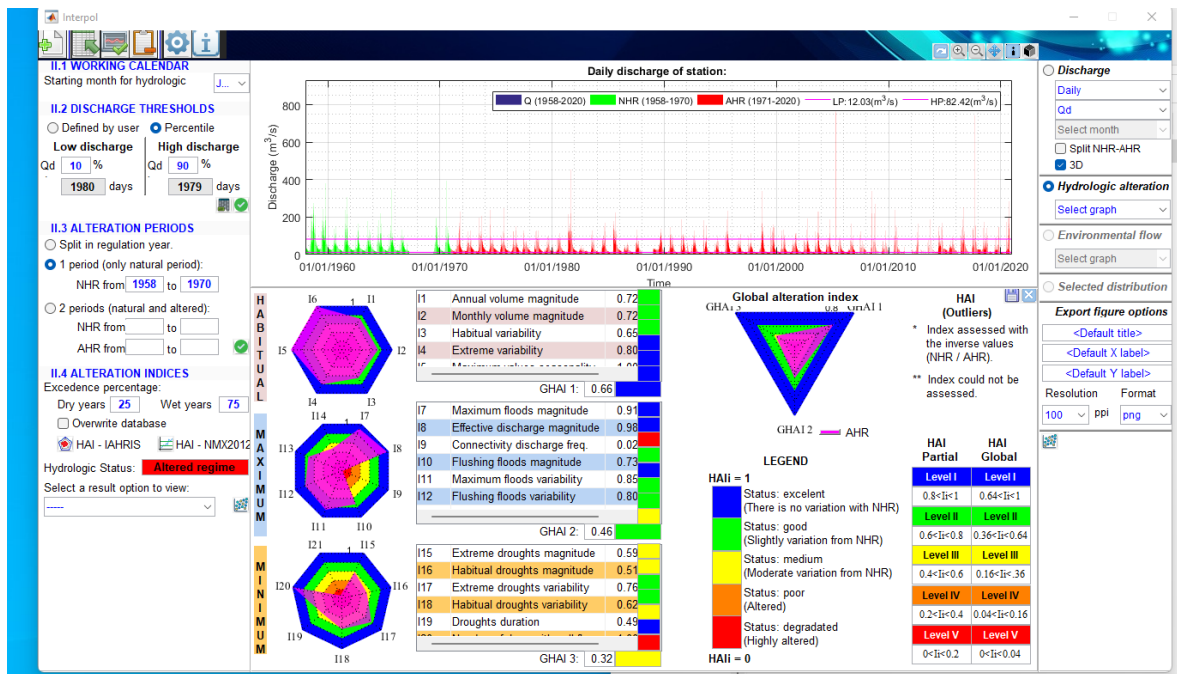


Figura 4.5: Alteración hidrológica estación 18437.

4.1.2 Imágenes Satelitales

Una vez culminado el análisis de los caudales, se pasó al procesamiento de las imágenes satelitales, para esto se descargaron un total de 167 imágenes y luego del filtrado quedaron 100 imágenes para procesar (ver tablas 4.1). Todas fueron procesadas en el programa SNAP, en la figura 4.6 A se puede observar cómo entrada la imagen al SNAP y en la figura 4.6 B se

observa la imagen una vez procesado. Aquí se puede observar la mejora en la calidad de las imágenes luego del procesamiento en el programa SNAP.

Una vez procesadas las imágenes, fueron trabajadas en QGIS para realizar las correcciones geométricas y eliminar las nubes en función de la capa SLC obtenida en el SNAP. En las figuras 4.7 se puede observar la salida de la banda SLC con sus diferentes clases o niveles ya mencionadas anteriormente. En la figura 4.8 se observa el eje del río y el buffer a 50 m. A esta imagen ya se le ha restado la banda SLC, donde en el zoom podemos ver en el medio de él río las nubes.

Tabla 4.1: Disponibilidad de datos.

Mes	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Enero			2	3	0	0
Febrero			1	3	6	3
Marzo			1	3	3	4
Abril			0	5	5	3
Mayo			1	2	1	2
Junio			0	0	2	1
Julio			1	4	0	0
Agosto			1	4	3	0
Septiembre			0	2	0	2
Octubre			1	4	1	3
Noviembre			2	2	3	3
Diciembre	1	2	3	4	1	2
Total	1	2	13	36	25	23

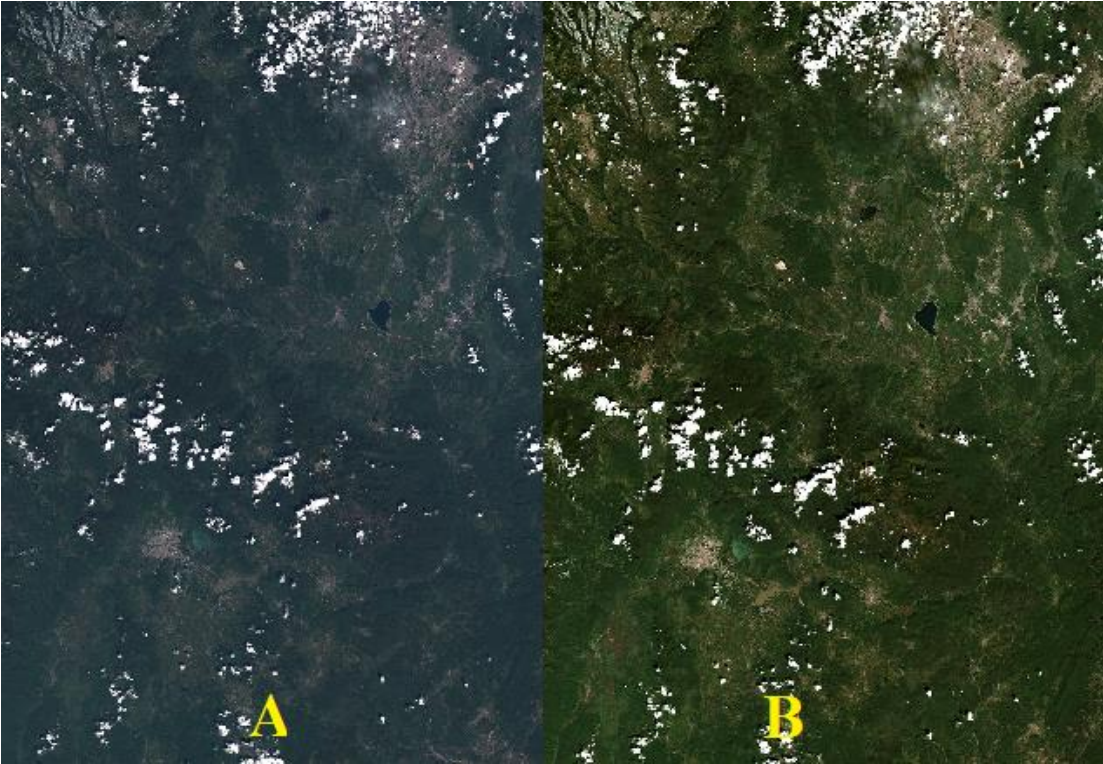


Figura 4.6: (A) Banda TCL sin procesar. (B) Banda TCL procesada en el programa SNAP. Ambas imágenes de fecha 2017/10/14 con resolución de 10m.

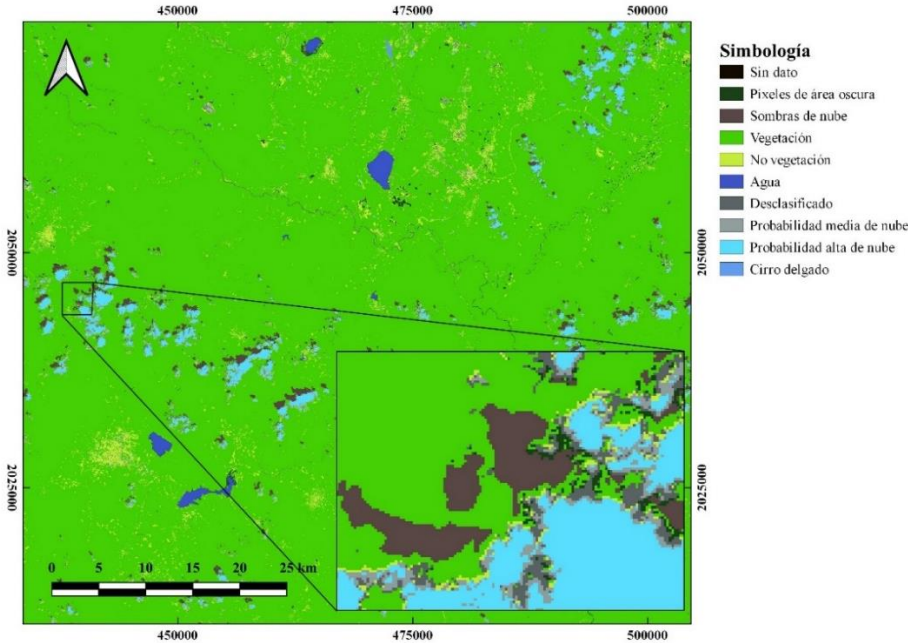


Figura 4.7: Salida del SNAP, banda SLC con resolución de 20m para la fecha 2017/10/14.

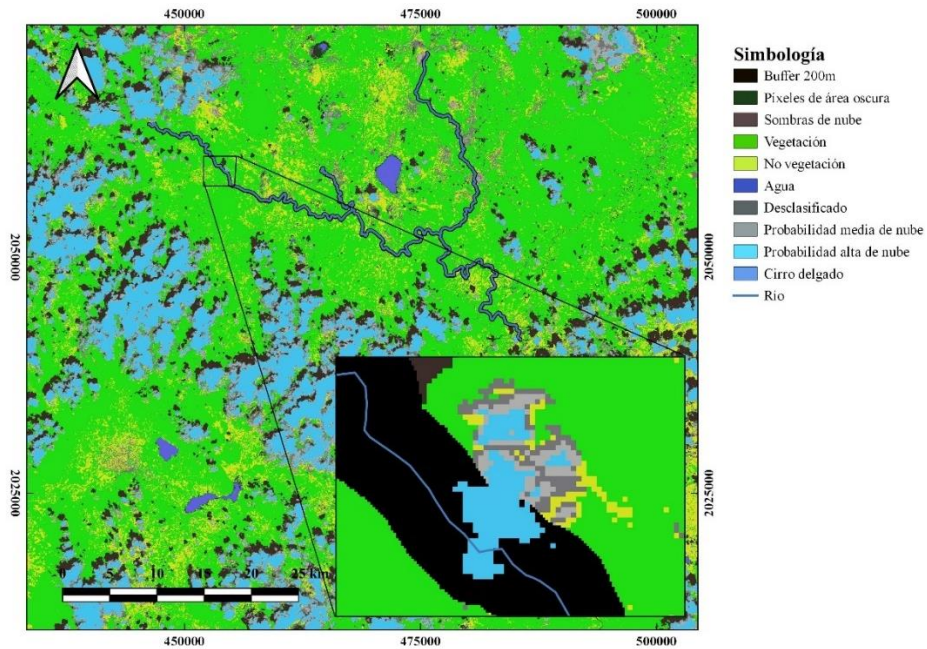


Figura 4.8: Ejemplo de procesamiento de nubes, banda SLC con resolución de 20m para la fecha 2019/11/23.

El mapa creado de disponibilidad de información por píxel por imagen se muestra en la figura 4.9. En el mismo se observa como en la mayoría del área de estudio se cuenta con suficiente información, sin embargo, hay pequeños tramos de color azul donde hay más de 5 imágenes de las 100 disponibles que no cuentan con datos en esa área.

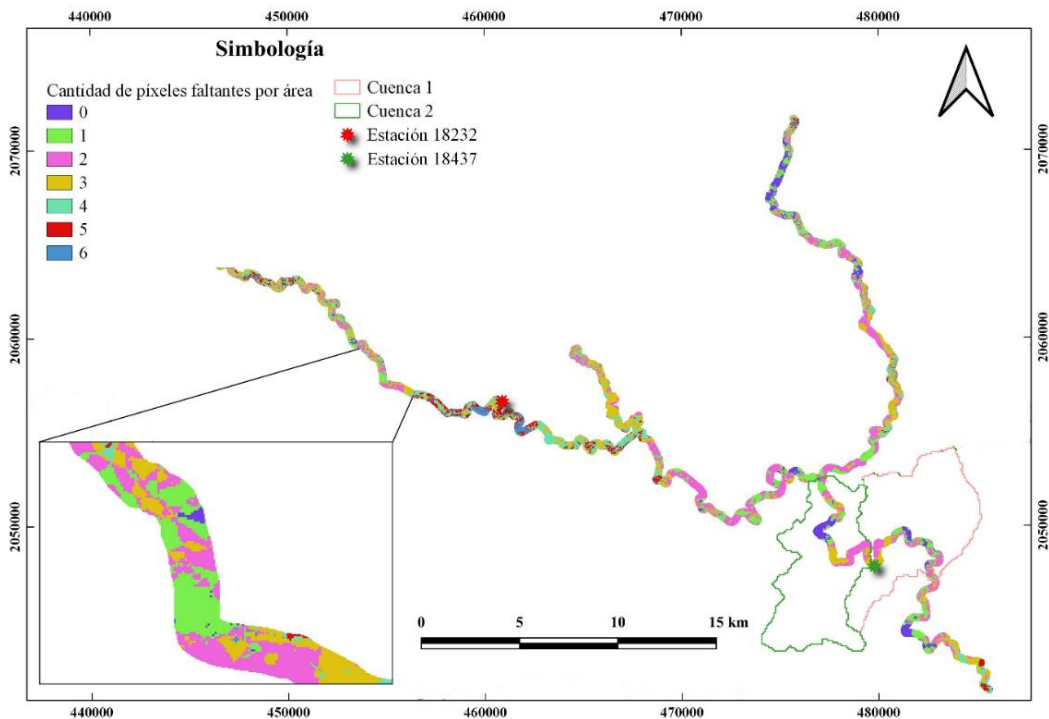


Figura 4.9: Representación de la cantidad de píxel faltantes por área.

4.2 Periodos de retornos

La función de probabilidad que mejor se ajustó a las series de caudales fue la función Log-Pearson III. Como se puede observar en las figuras 4.10 y 4.11.

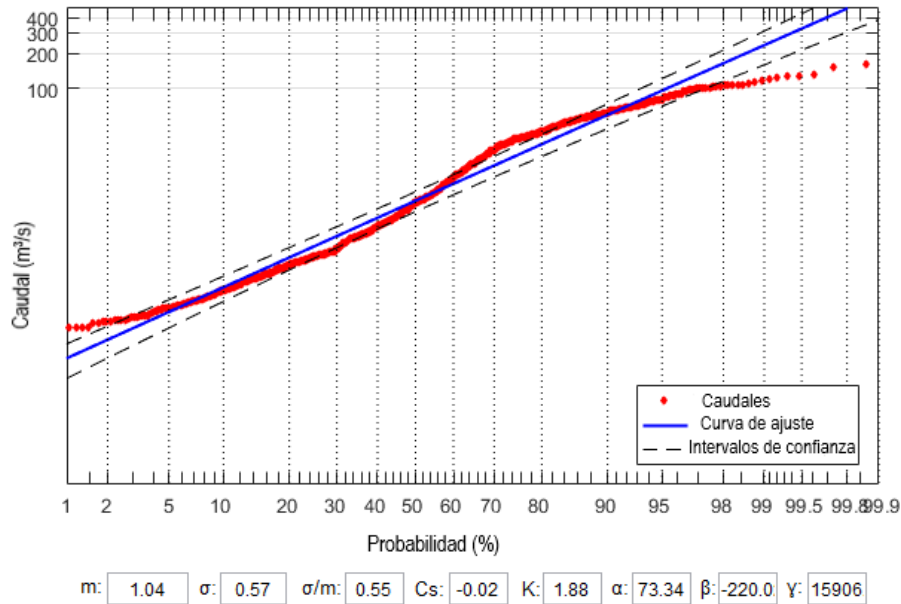


Figura 4.10: Función de mejor ajuste Log-Pearson III, estación 18232.

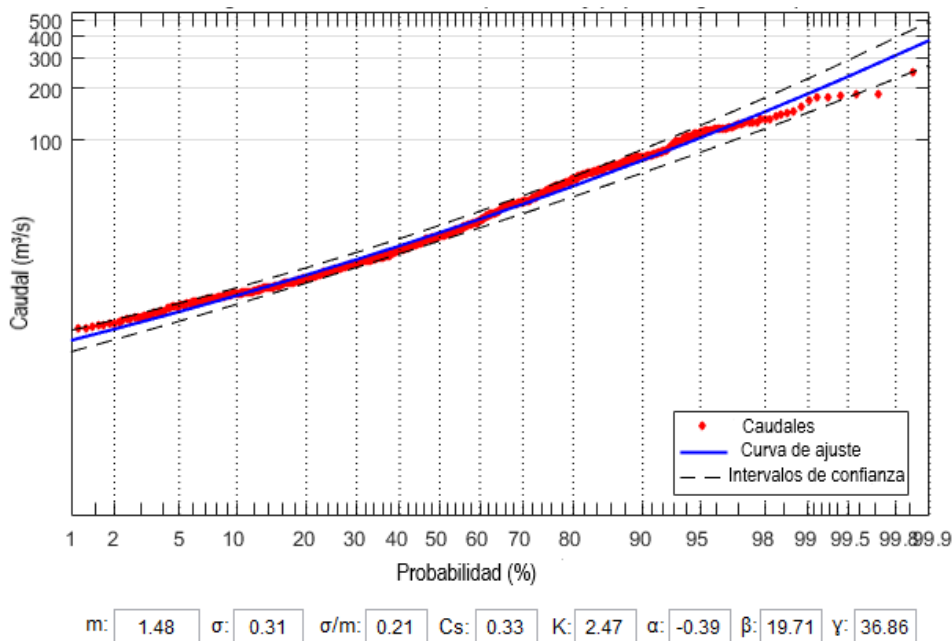


Figura 4.11: Función de mejor ajuste Log-Pearson III, estación 18437

Una vez obtenida la función Log-Pearson III como la de mejor ajuste se procedió al análisis de frecuencias de ambas estaciones, para obtener los periodos de retornos asociados. Para este fueron utilizadas las ecuaciones de la función Log-Pearson III. Como resultado se obtuvo

la probabilidad de no excedencia, la probabilidad de excedencia y periodos de retornos asociados de manera mensual.

Tabla 4.2: Resumen de análisis de frecuencia estación 18232.

Fecha	Caudal de 30 días antes (m ³ /s)	Porbabilidad de no excedencia	Probabilidad de excedencia	Periodo de retorno
12/4/2015	26.18	0.76	0.24	4.15
12/18/2016	10.83	0.52	0.48	2.09
12/28/2016	9.94	0.50	0.50	1.99
1/7/2017	8.73	0.46	0.54	1.85
1/27/2017	4.56	0.28	0.72	1.39
.
.
.
.
.
7/10/2020	14.19	0.60	0.40	2.50
8/9/2020	27.36	0.77	0.23	4.33
9/13/2020	49.08	0.88	0.12	8.19
9/28/2020	70.68	0.92	0.08	13.14
10/18/2020	53.44	0.89	0.11	9.10

Tabla 4.3: Resumen de análisis de frecuencia estación 18437.

Fecha	Caudal de 30 días antes (m ³ /s)	Porbabilidad de no excedencia	Probabilidad de excedencia	Periodo de retorno
12/4/2015	31.46	0.60	0.40	2.50
12/18/2016	30.44	0.58	0.42	2.40
12/28/2016	27.61	0.53	0.47	2.13
1/7/2017	23.89	0.45	0.55	1.82
1/27/2017	19.43	0.34	0.66	1.51
.
.
.
.
.
7/10/2020	28.76	0.55	0.45	2.23
8/9/2020	34.81	0.65	0.35	2.87
9/13/2020	65.22	0.88	0.12	8.52
9/28/2020	141.92	0.98	0.02	55.28
10/18/2020	112.43	0.97	0.03	29.86

Este análisis se realizó para cada estación como su muestran en las tablas 4.2 y 4.3. Para obtener información más completa ver Anexo 1 y Anexo 2. En las tablas 4.4 se muestran los caudales umbrales asociados a cada uno de los periodos de retornos, obtenidos de la unión del análisis de frecuencia y las imágenes disponibles, para cada estación hidrométrica.

Tabla 4.4: Caudales umbrales asociados a los periodos de retorno estación 18232.

Periodos de retorno (años)	Caudales umbrales estación 18232 (m ³ /s)	Caudales umbrales estación 18437 (m ³ /s)
2	9.94	24.26
5	30.99	45.11
10	55.77	67.47
20	94.36	90.08

4.3 Clasificación espacio-temporal del río y zonas riparas

El tamaño de muestra arrojado por el Roasoft para determinar el número mínimo de pixeles para los sitios de entrenamiento por clase fue de 384 pixeles, por lo que se tomaron valores por encima de este para determinar los sitios de entrenamiento para MaxEnt y SVM. En la figura 4.12 se muestra un ejemplo de cómo fueron seleccionados. Exactamente fueron tomados 134 pixeles de arena, 132 de vegetación y 190 de río.

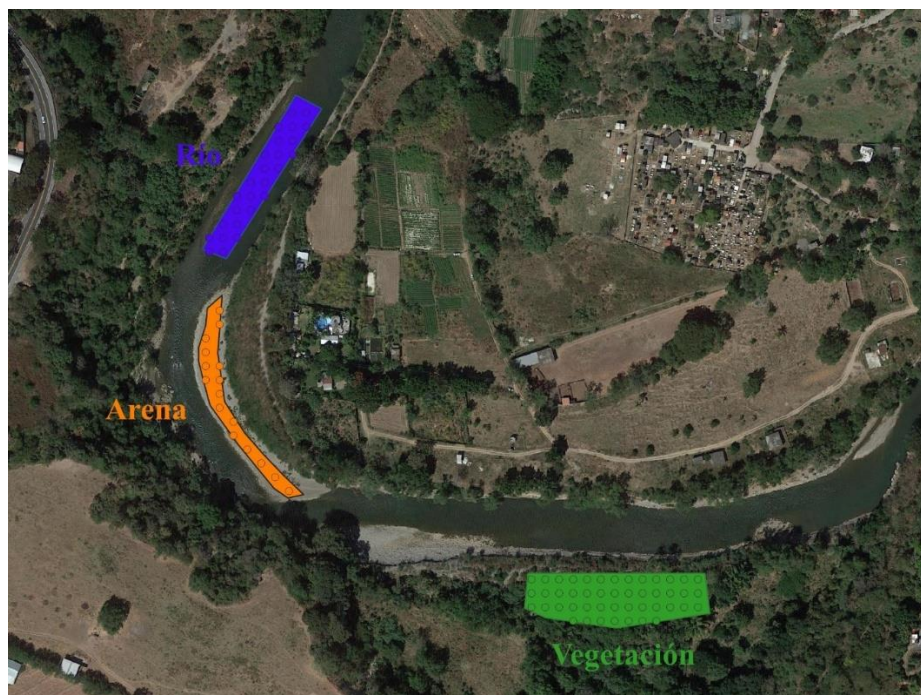


Figura 4.12: Ejemplos de polígonos y puntos para el MaxEnt y SVM.

Una vez corridos ambos algoritmos quedaron conformados los mapas de clasificación por cuenca como se muestra en las figuras de la 4.13 a la 4.16. La figura 4.13 es un ejemplo de la comparación visual entre ambos algoritmos. En la figura 4.13 (a) se puede observar como el MaxEnt no es capaz de identificar bien la arena. Por el contrario, si vemos la figura 4.13 (b), vemos como el SVM logra identificar un mayor grado de detalle en la imagen. Lo mismo pasa con todas las demás escenas.

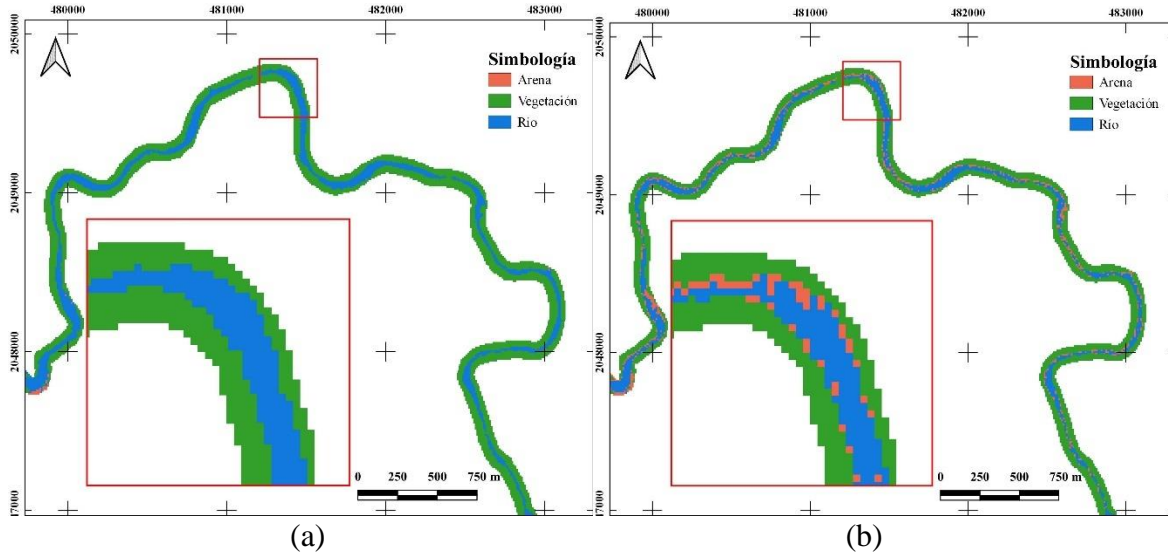


Figura 4.13: (a) Clasificación con MaxEnt, (b) Clasificación con SVM, cuenca 1.

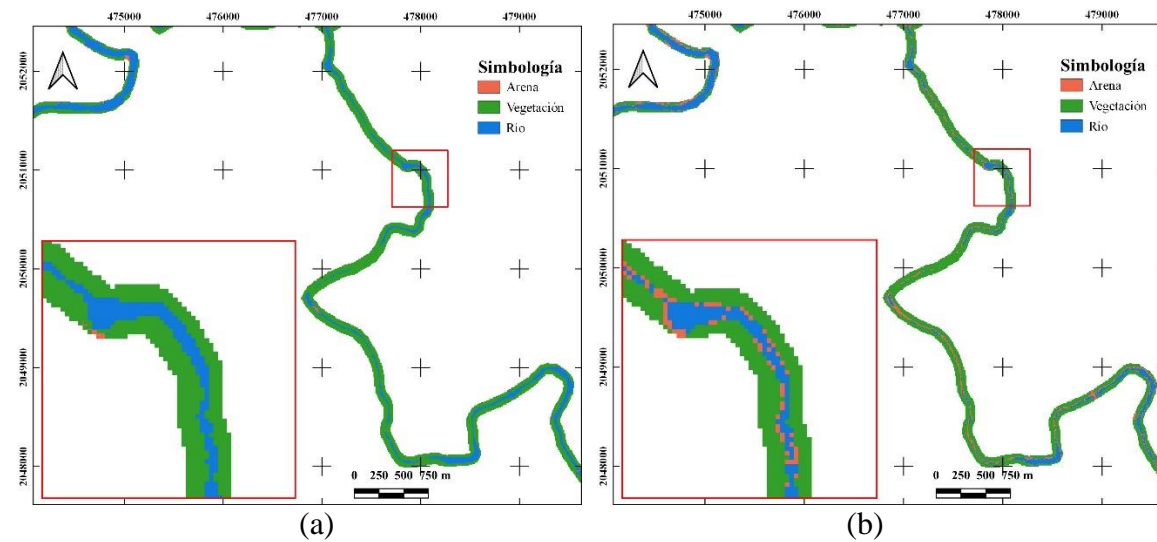


Figura 4.14: (a) Clasificación con MaxEnt, (b) Clasificación con SVM, cuenca 2.

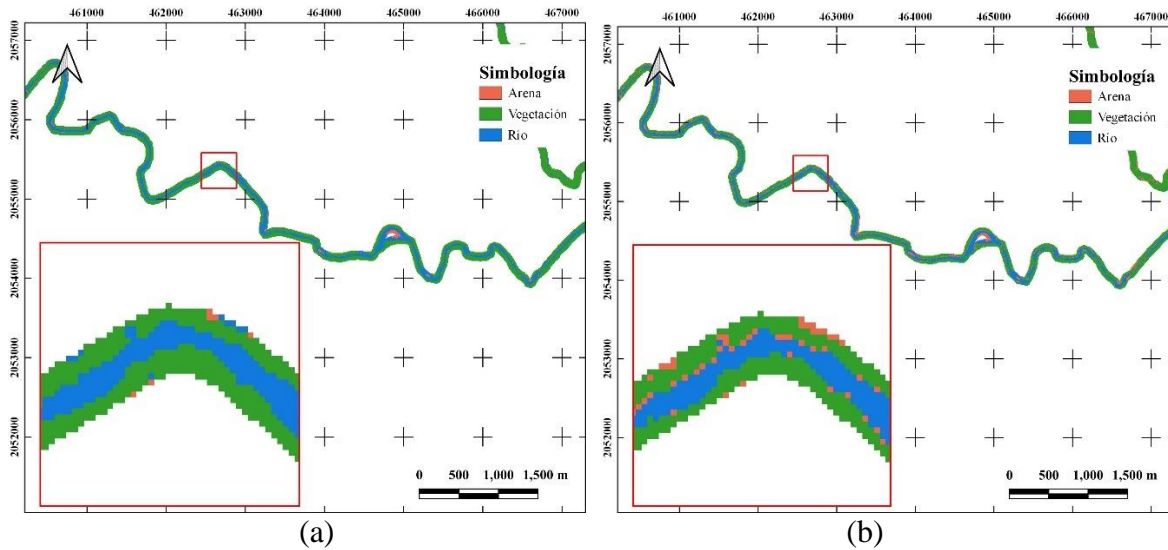


Figura 4.15: (a) Clasificación con MaxEnt, (b) Clasificación con SVM, cuenca 4.

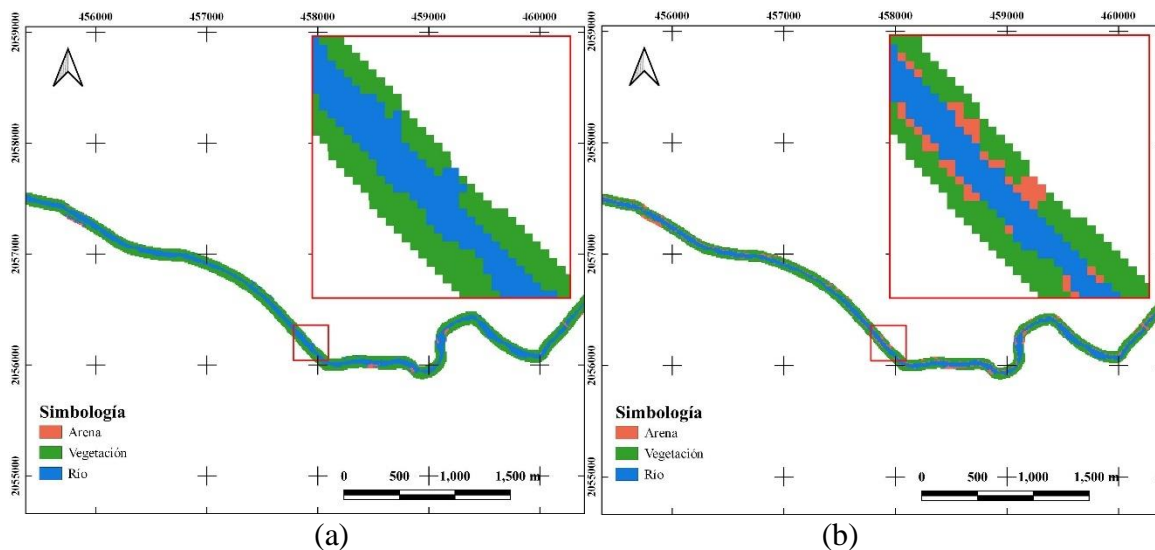


Figura 4.16: (a) Clasificación con MaxEnt, (b) Clasificación con SVM, cuenca 5.

Debido a que en la vista general no se puede apreciar muy bien las diferencias entre la clasificación de un algoritmo y otro. A continuación, se le hace un zoom a la cuenca cuatro y se compara con la imagen real (figuras 4.17 A). En la misma se puede ver claramente como el SVM (figuras 4.17 C) logra tener más detalle que MaxEnt (figuras 4.17 B). Se ve como el MaxEnt no es capaz de diferenciar la arena. Por lo que sólo haciendo un análisis visual el SVM logra distinguir mucho mejor el área que el MaxEnt.

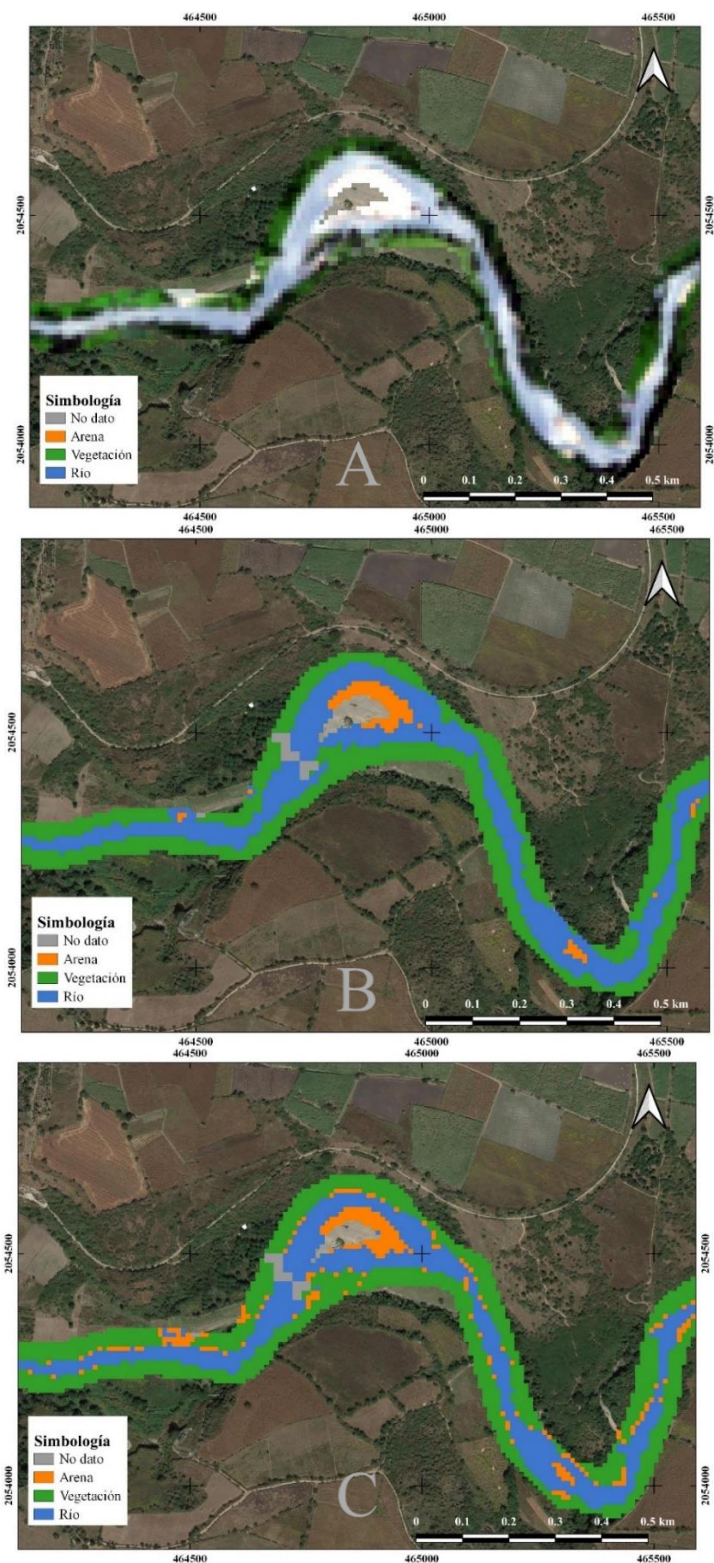


Figura 4.17: (A) Vista satelital del río. (B) Clasificación con MaxEnt, (C) Clasificación con SVM. Imagen 2017/10/14.

En la figura 4.18 se pueden observar los resultados obtenidos a partir de matriz de confusión para ambos algoritmos. En estos se observa como el MaxEnt presenta valores de *Producer's Accuracy* inferiores al 70% (línea naranja) para todas las clases excepto río, mientras que el SVM también presenta valores por debajo de este umbral, pero en menor proporción. En cuanto al *Overall Accuracy* se observa que para el MaxEnt existen algunos valores por debajo del umbral establecido. Sin embargo, el SVM no presenta ningún valor por debajo de este umbral y la gran mayoría de sus valores están por encima del 80%. Como resultado de la comparación de los dos algoritmos se determinó que el SVM presenta cierta superioridad ante al MaxEnt a la hora de la realizar las clasificaciones.

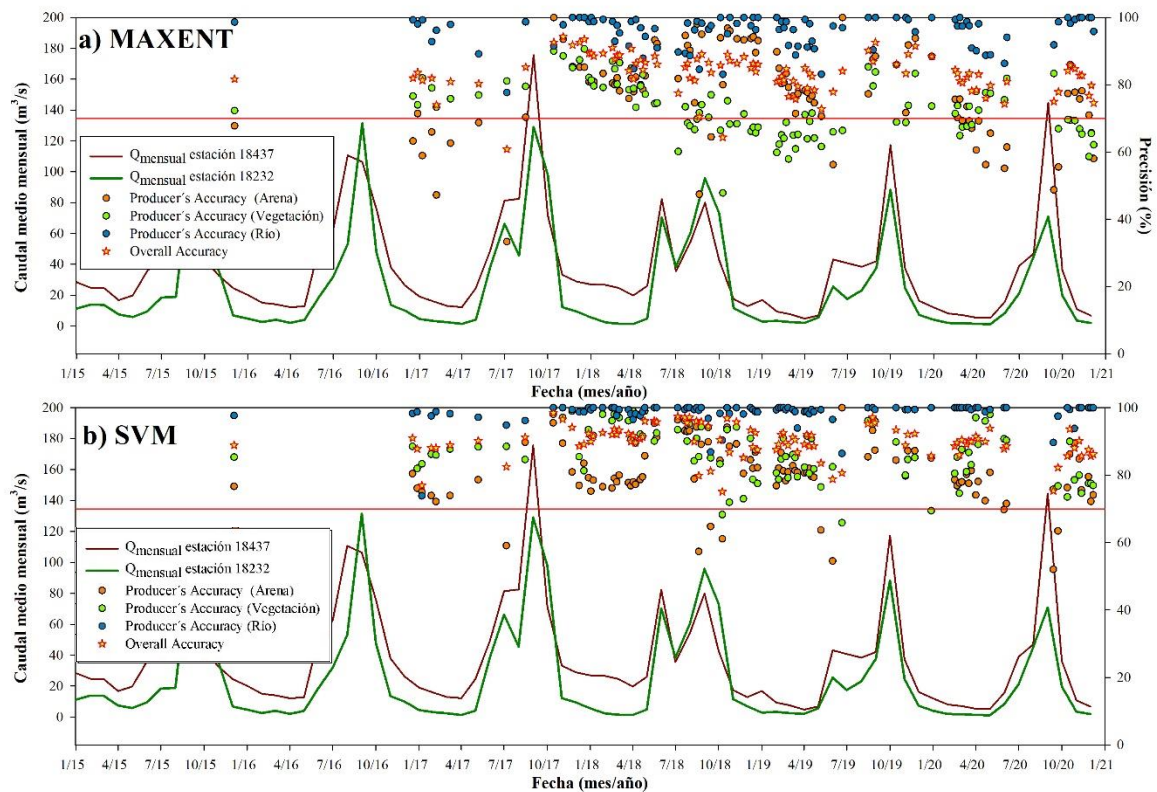


Figura 4.18: Parámetros de calidad de clasificación con MaxEnt obtenidos a partir de matriz de confusión.

Los valores arrojados por las curvas ROC, es decir los valores de AUC se muestran resumidos para ambos algoritmos en la figura 4.19. En la misma se puede observar cómo la vegetación es la que mejor logran identificar ambos algoritmos, seguido la de río y por último la de arena. Cabe resaltar que entre los dos algoritmos SVM presenta para cada una de las clases valores superiores a los reportados con el MaxEnt.

Al comienzo del análisis de los datos se pensó que podía existir alguna relación directa entre los caudales máximos y la correcta clasificación por parte de los algoritmos, pues a mayor caudal mayor área de inundación. Sin embargo, como se observa en la figura 4.19 los resultados son bastante aleatorios y no se aprecia ninguna relación. Guiándonos por el valor limite escogido anteriormente se determinó que el algoritmo SVM presenta menos valores por debajo de este, lo que representa una mejor clasificación.

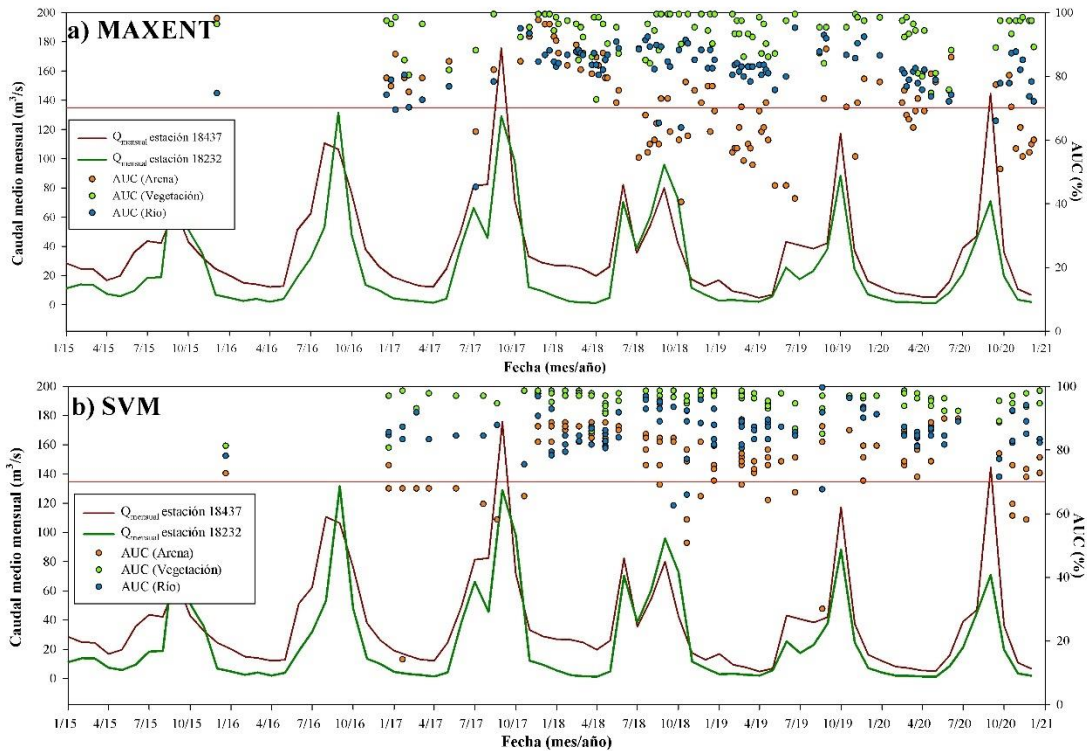


Figura 4.19: Valores de AUC de las clasificaciones con SVM y MaxEnt a partir de la curva ROC.

Teniendo en cuenta los gráficos de validación anteriores se puede concluir que el SVM logra clasificar mejor que el MaxEnt el área de estudio. Ya que en ambos casos presenta valores superiores al MaxEnt. Lo mismo se evidencia en las imágenes de clasificación que se mostraron anteriormente. Por lo que para determinar la dinámica del río Amacuzac y sus zonas riparias se tomará en cuenta la clasificación arrojada por el algoritmo SVM de la caja de herramientas de Orfeo en QGIS.

4.4 Dinámica espacio temporal del río basada en probabilidades

Luego de unir las fechas asociadas a cada periodo de retorno con las imágenes correspondientes a las clasificaciones, se obtuvieron los mapas de probabilidad que representa la dinámica espacio temporal del río Amacuzac y sus zonas riparias. Estas se

representan por las cuencas seleccionadas anteriormente teniendo en cuenta la disponibilidad de datos. Para este análisis fueron seleccionados los datos correspondientes a la estación 18437 para representar la dinámica de la cuenca 1 y cuenca 2, y los datos de la estación 18232 para las cuencas 4 y 5. Esto debido a la independencia que existe entre las estaciones.

En los mapas de las figuras posteriores (figura 4.18 – 4.21) se puede apreciar como al pasar el tiempo la zona de inundación de cada cuenca va cambiando. Los mapas que se muestran son el resultado de la presente investigación la cual se resume en dichos mapas. En los mismos se puede observar como para todas hay un río base que se mantiene constante en el tiempo y que se determinó a partir de las zonas que siempre resultaron ser río para las 100 imágenes utilizadas en este estudio. Por otro lado, se observa como las zonas más apegadas a las riberas si cambian gradualmente su forma. Lo que se traduce aquí con valores de probabilidad para su mejor comprensión y los cuales están divididos en función del periodo de retorno (2, 5, 10 y 20) y de la temporada (seca y lluviosa).

Cabe resaltar que esta clasificación se puede utilizar para predecir situaciones venideras. Esto se debe a que para su análisis se tuvieron en cuenta datos históricos de caudales des de 1970 hasta la actualidad (se seleccionó a partir de 1970 ya que es el periodo de regulación de ambas cuencas). Cabe resaltar que el periodo de estudio ha sido completamente sobre un periodo alterado del río. Por lo anterior mencionado este es otro punto importante determinado, para que los gestores del agua en el río puedan tomar decisiones a futuros comportamientos del río. Es decir, saber la recurrencia con la que se inunda el río, entender su dinámica y determinar sus cambios en el tiempo. Pudiendo ser este estudio una línea base que analiza el estado y la dinámica del sistema.

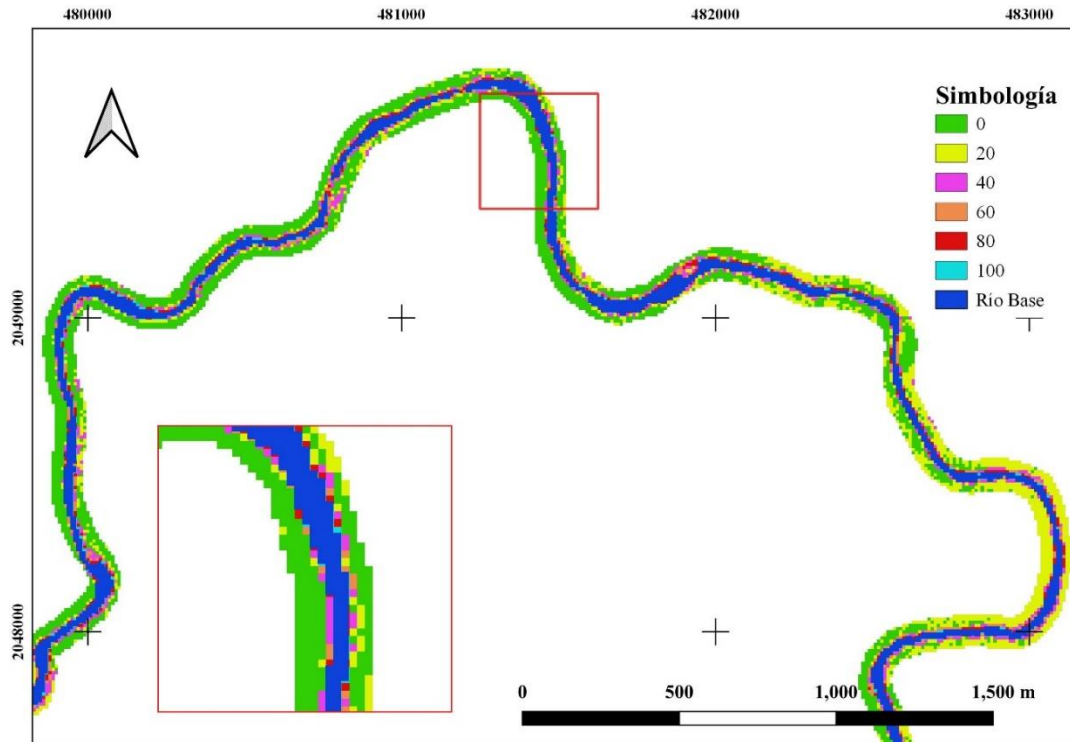


Figura 4.20: Mapa de probabilidad de inundación: Cuenca 1 periodo de lluvias, estación 18737, $Tr=2$ años.

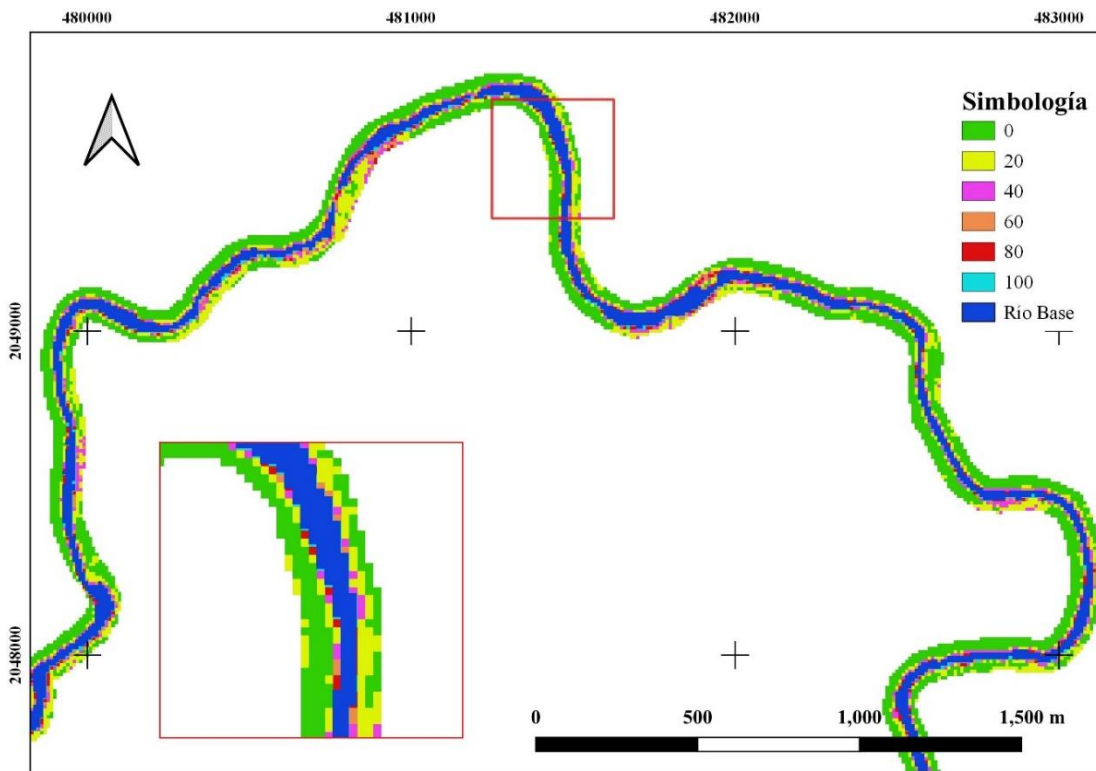


Figura 4.21: Mapa de probabilidad de inundación: Cuenca 1 periodo de seca, estación 18737, $Tr=2$ años.

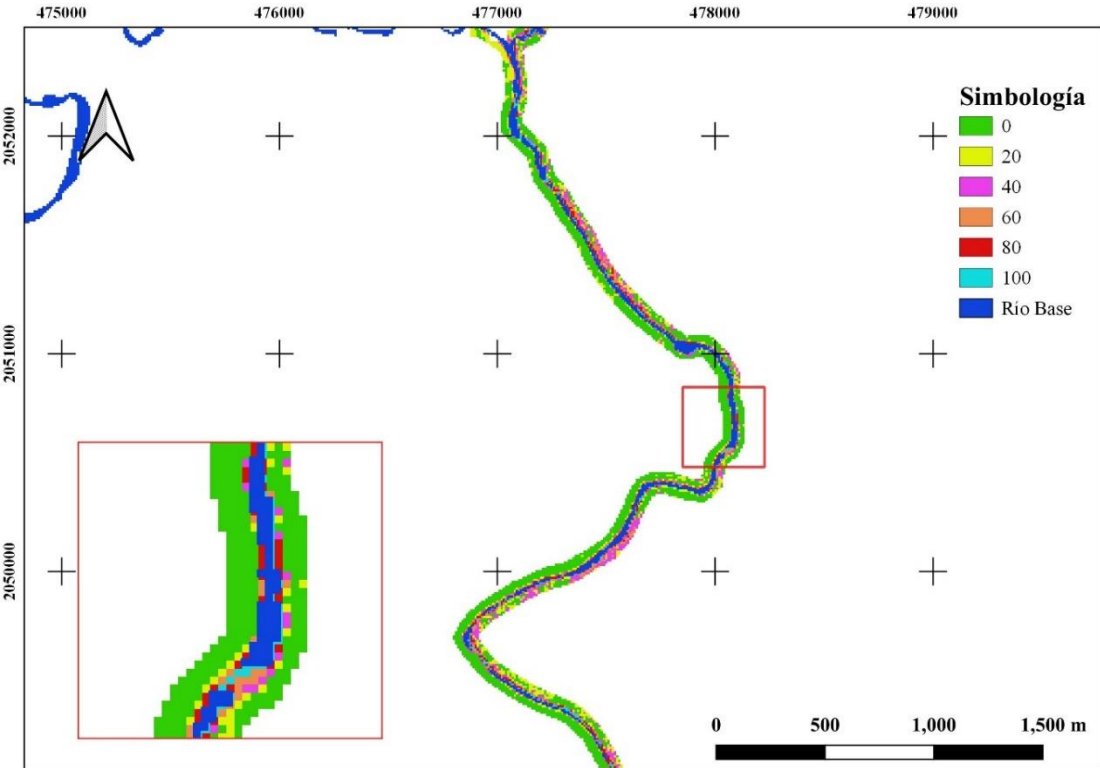


Figura 4.22: Mapa de probabilidad de inundación: Cuenca 2 periodo de lluvia, estación 18737, Tr=2 años.

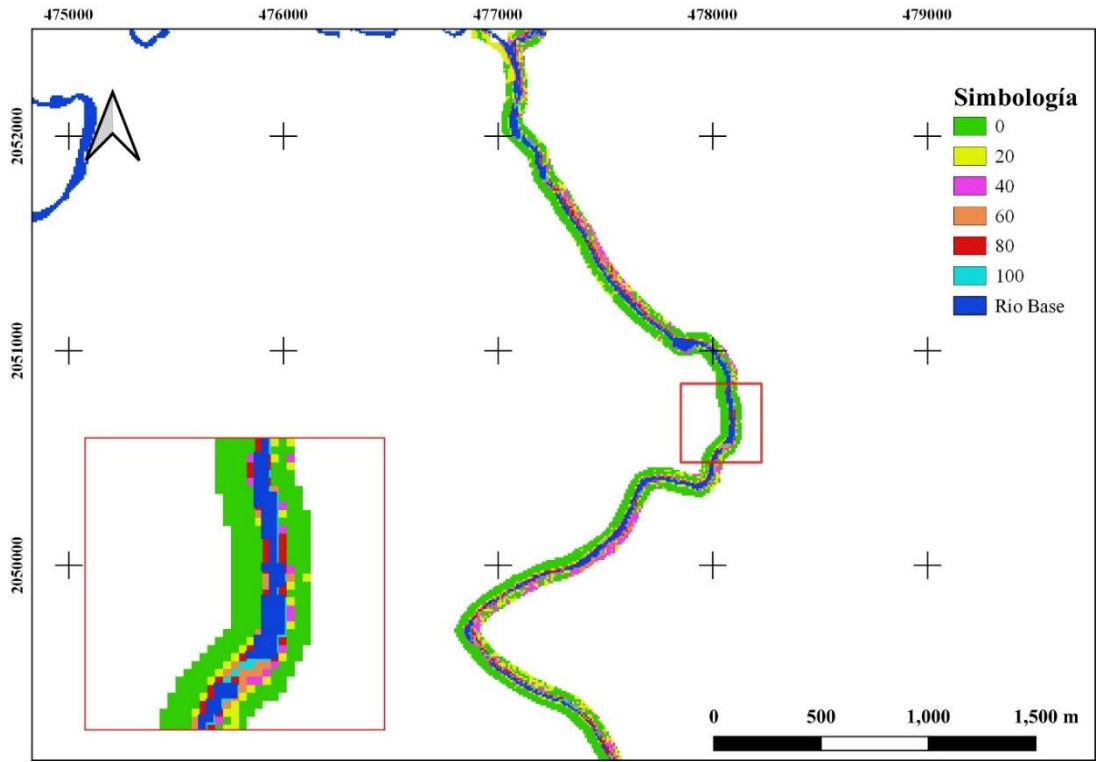


Figura 4.23: Mapa de probabilidad de inundación: Cuenca 2 periodo de seca, estación 18737, Tr=2 años.

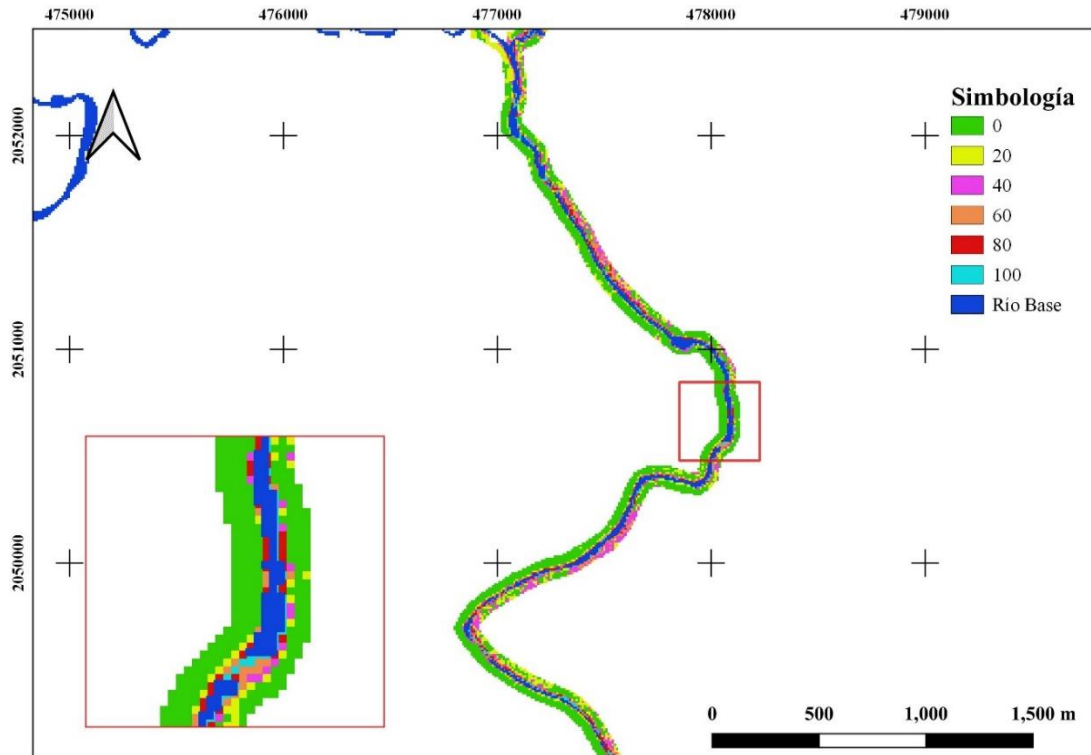


Figura 4.24: Mapa de probabilidad de inundación: Cuenca 4 periodo de lluvia, estación 18232, $Tr=2$ años.

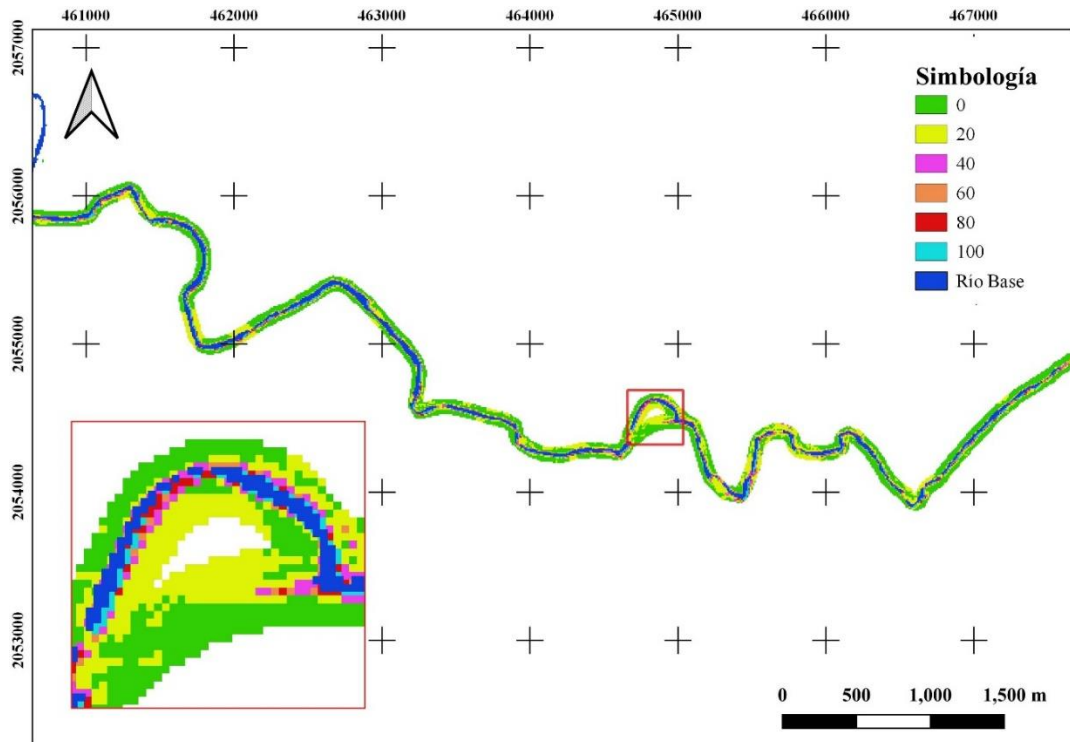


Figura 4.25: Mapa de probabilidad de inundación: Cuenca 4 periodo de seca, estación 18232, $Tr=2$ años.

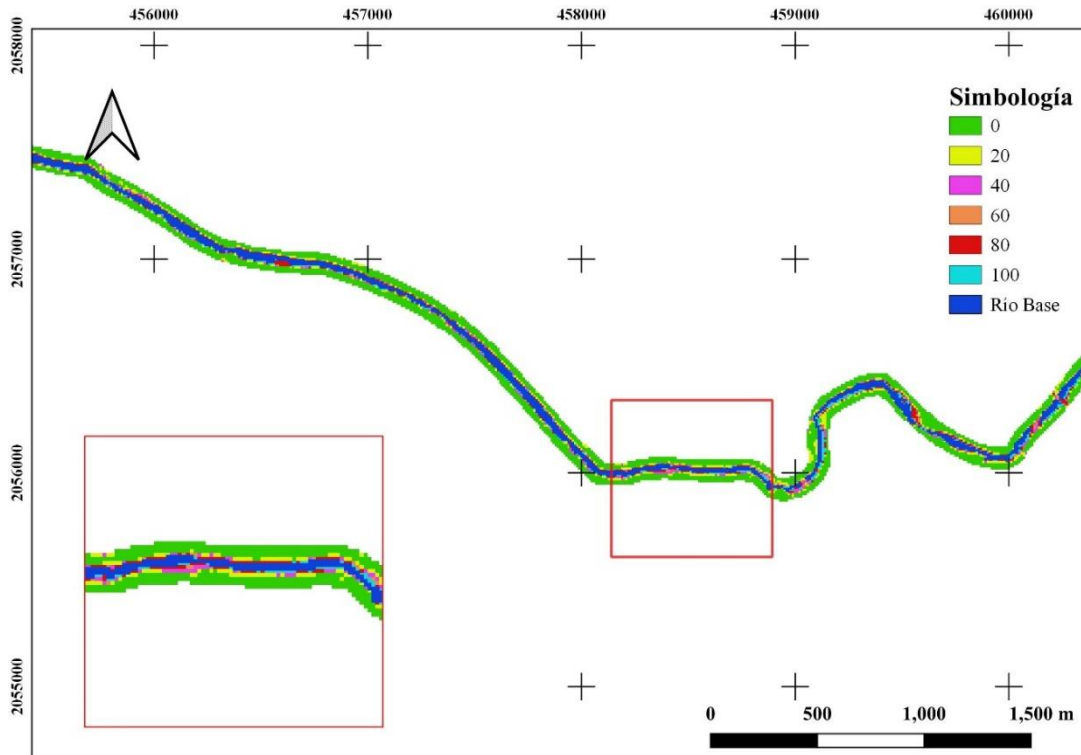


Figura 4.26: Mapa de probabilidad de inundación: Cuenca 5 periodo de lluvia, estación 18232, $Tr=2$ años.

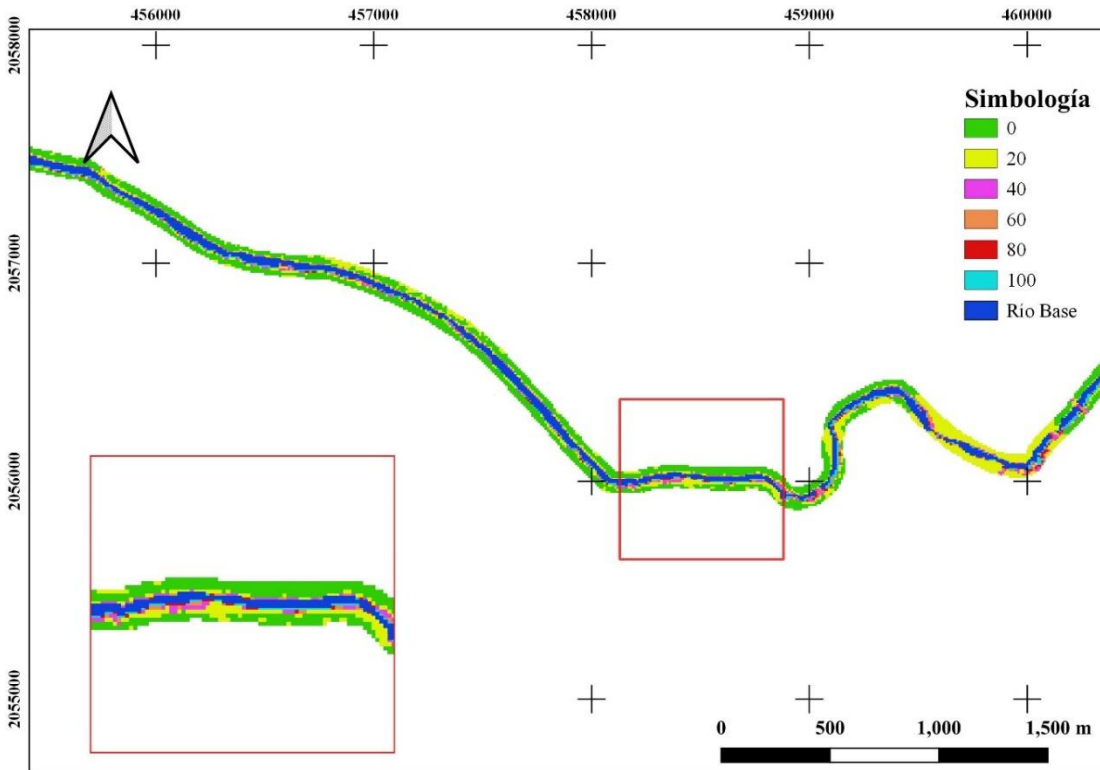


Figura 4.27: Mapa de probabilidad de inundación: Cuenca 5 periodo de seca, estación 18232, $Tr=2$ años.

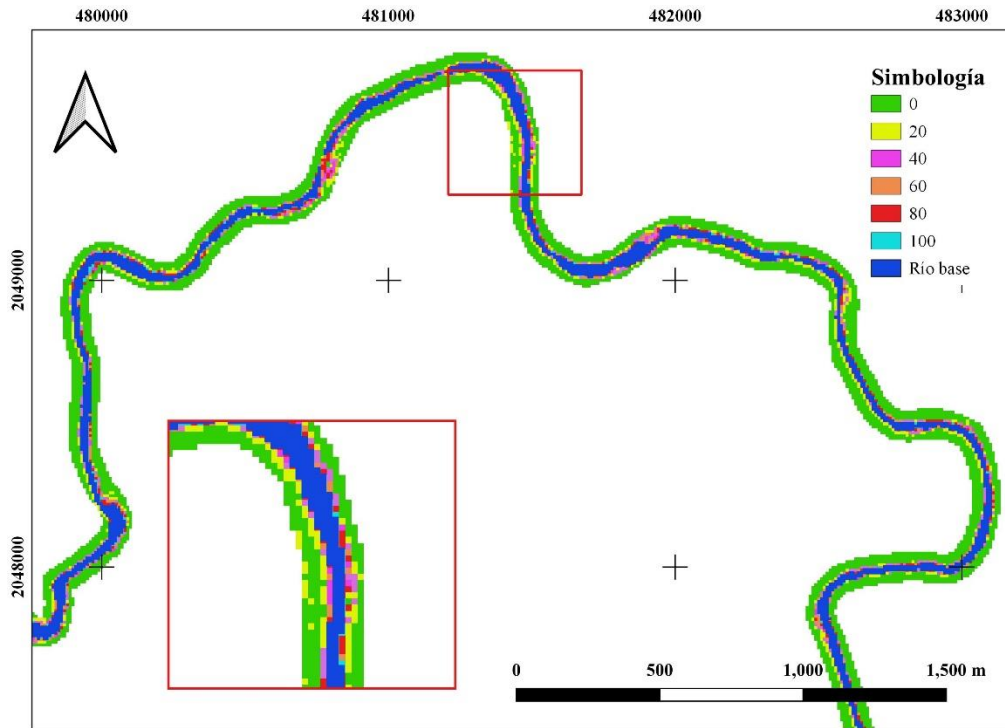


Figura 4.28: Mapa de probabilidad de inundación: Cuenca 1 periodo de lluvia, estación 18437, $Tr=5$ años.

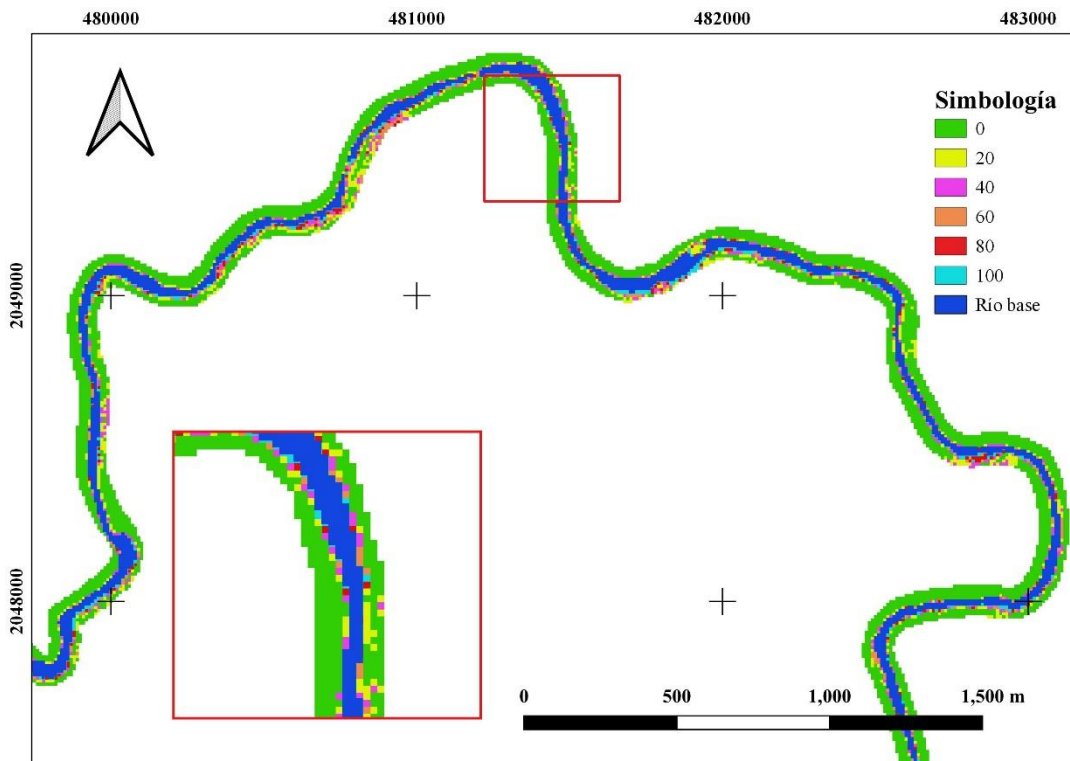


Figura 4.29: Mapa de probabilidad de inundación: Cuenca 1 periodo de seca, estación 18437, $Tr=5$ años.

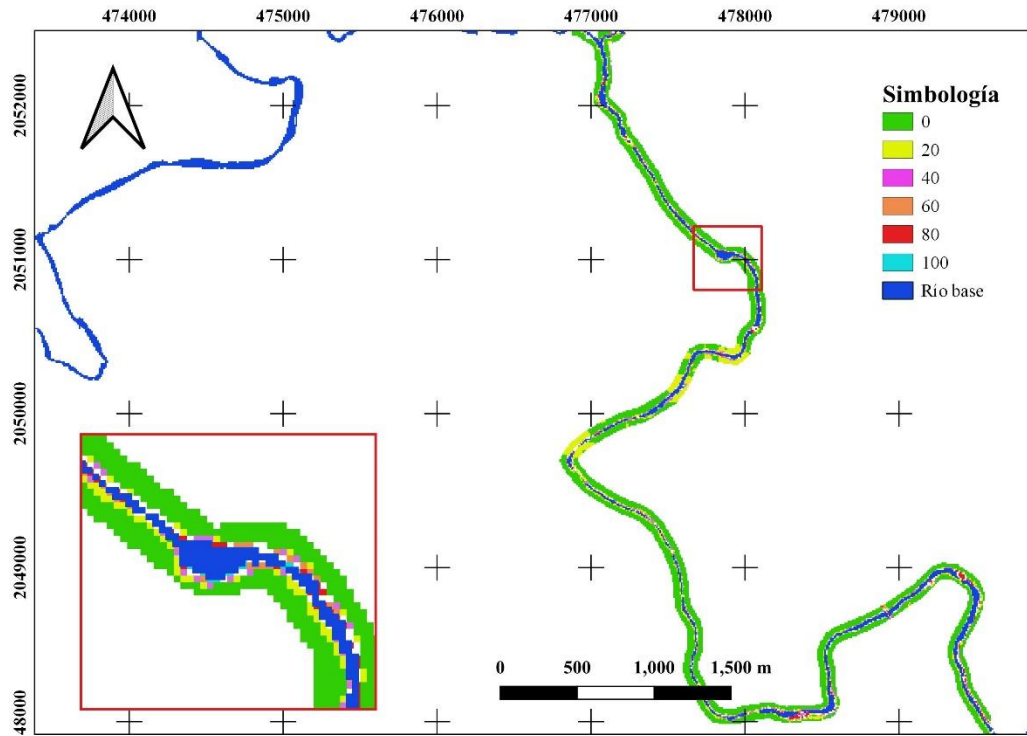


Figura 4.30: Mapa de probabilidad de inundación: Cuenca 2 periodo de lluvia, estación 18437, $Tr=5$ años.

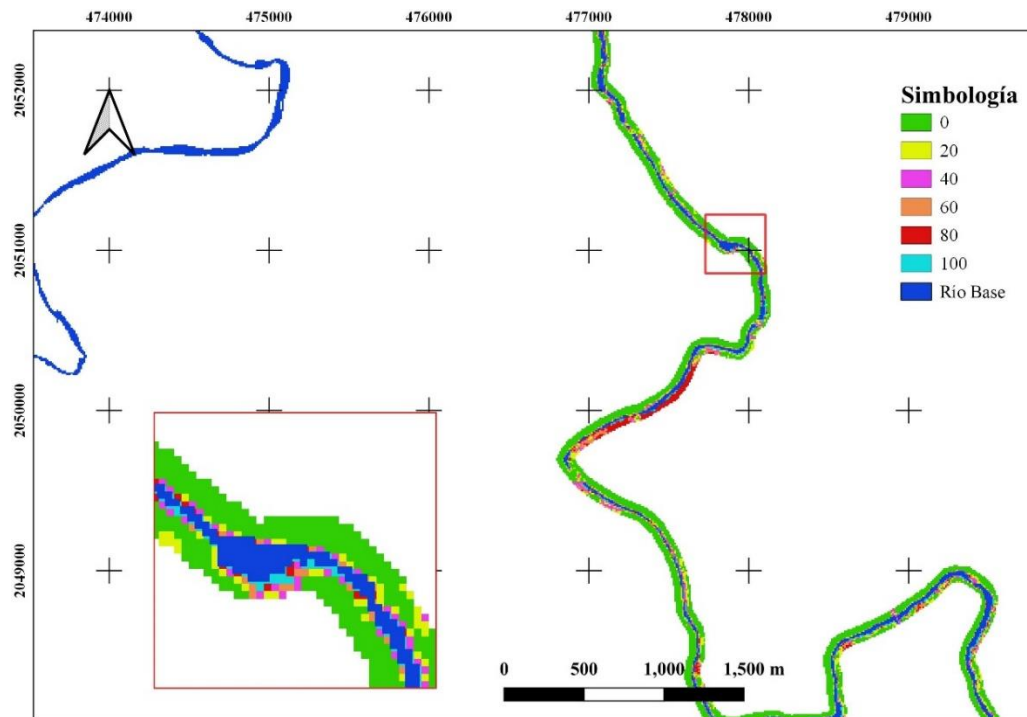


Figura 4.31: Mapa de probabilidad de inundación: Cuenca 2 periodo de seca, estación 18437, $Tr=5$ años.

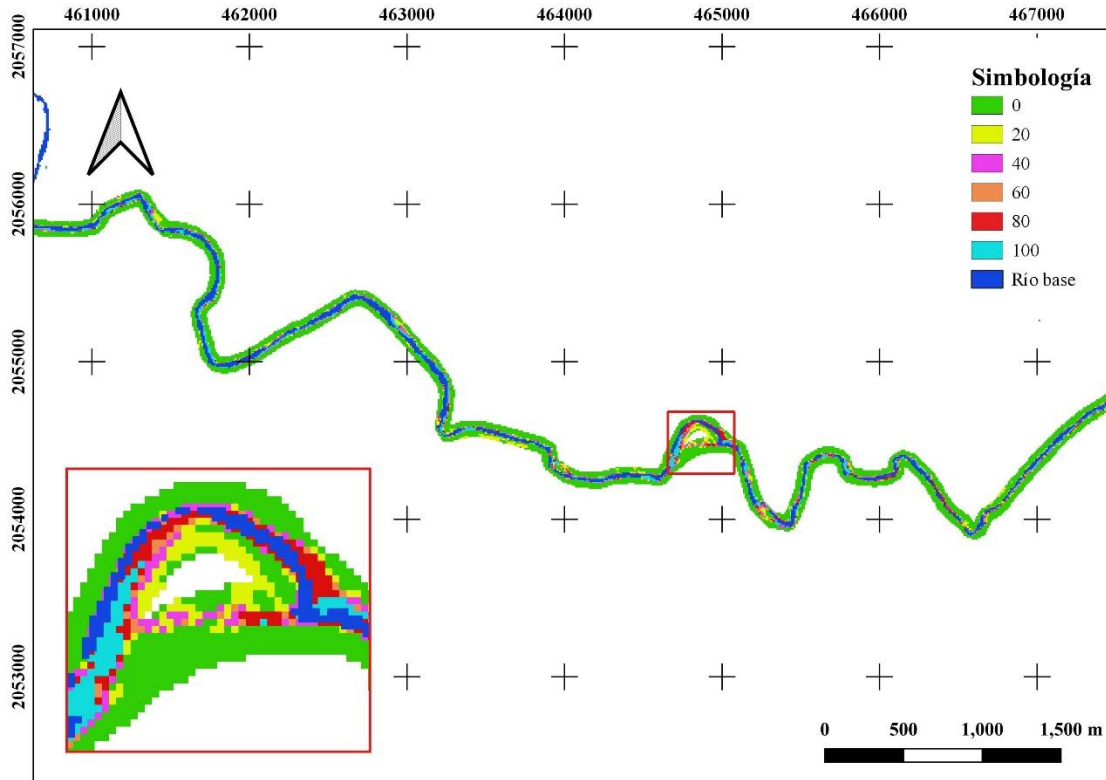


Figura 4.32: Mapa de probabilidad de inundación: Cuenca 4 periodo de lluvia, estación 18232, $Tr=5$ años.

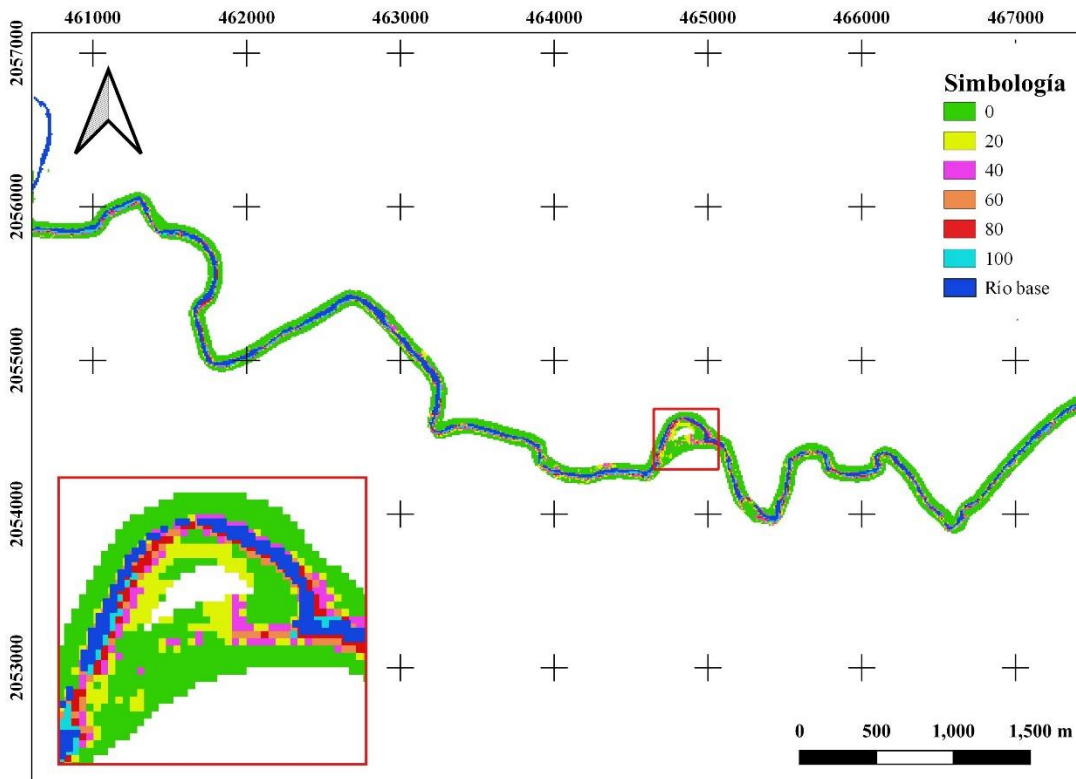


Figura 4.33: Mapa de probabilidad de inundación: Cuenca 4 periodo de seca, estación 18232, $Tr=5$ años.

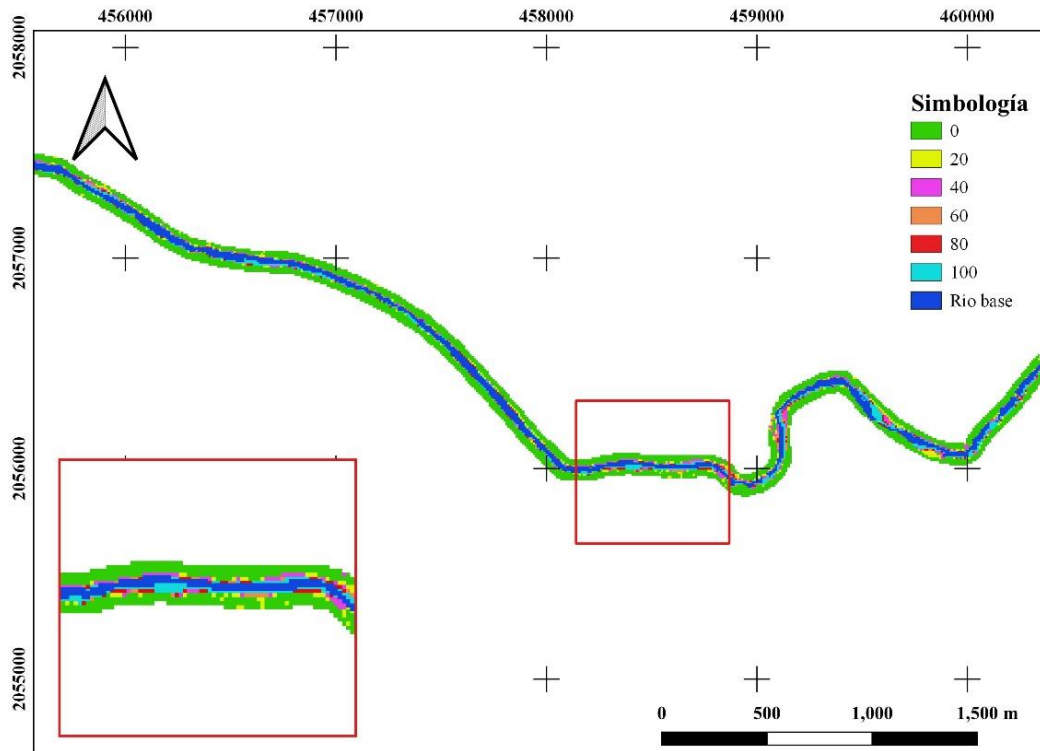


Figura 4.34: Mapa de probabilidad de inundación: Cuenca 5 periodo de lluvia, estación 18232, $Tr=5$ años.

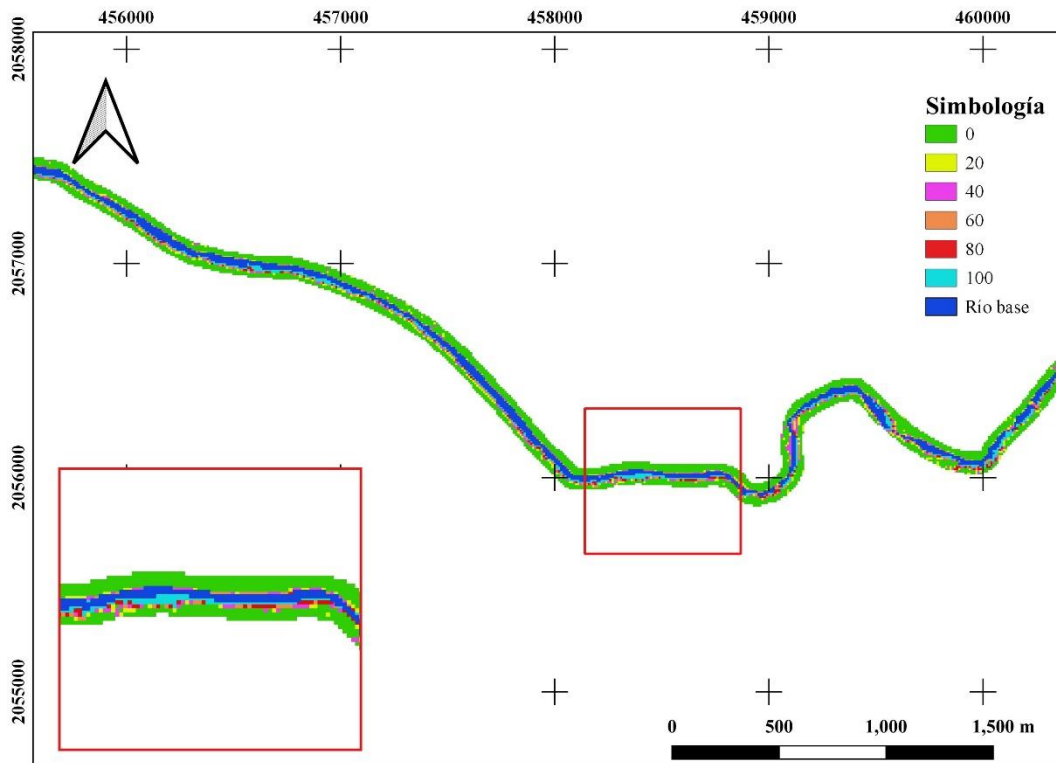


Figura 4.35: Mapa de probabilidad de inundación: Cuenca 5 periodo de seca, estación 18232, $Tr=5$ años.

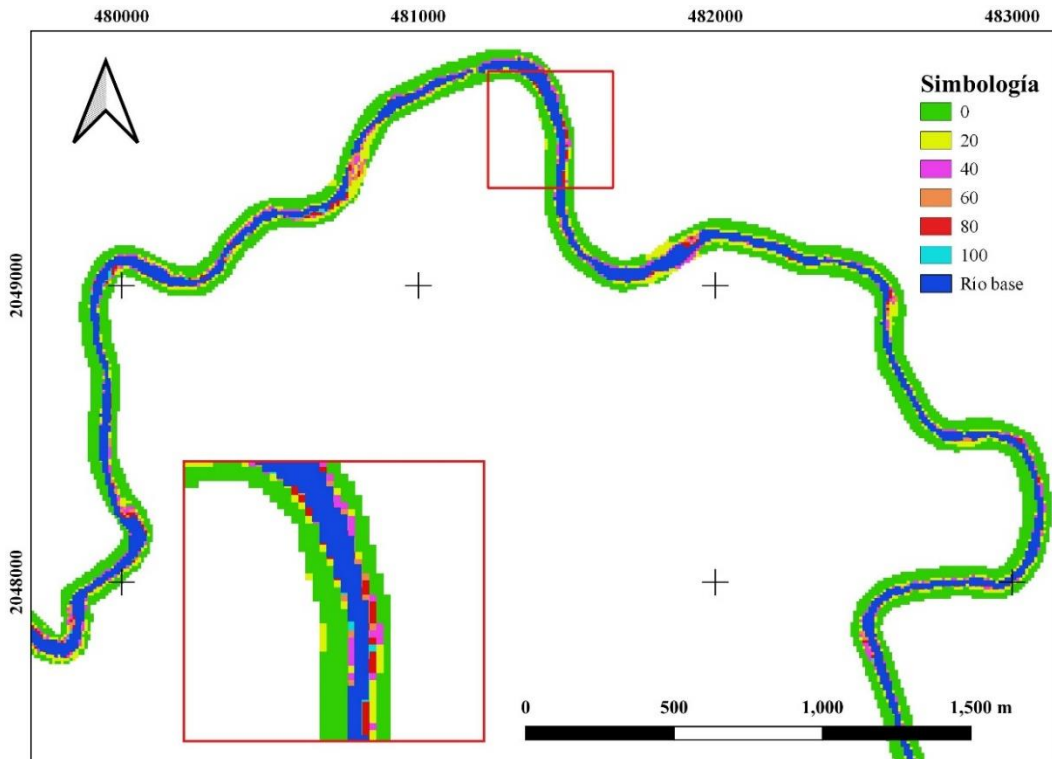


Figura 4.36: Mapa de probabilidad de inundación: Cuenca 1 periodo de lluvia, estación 18437, $Tr=10$ años.

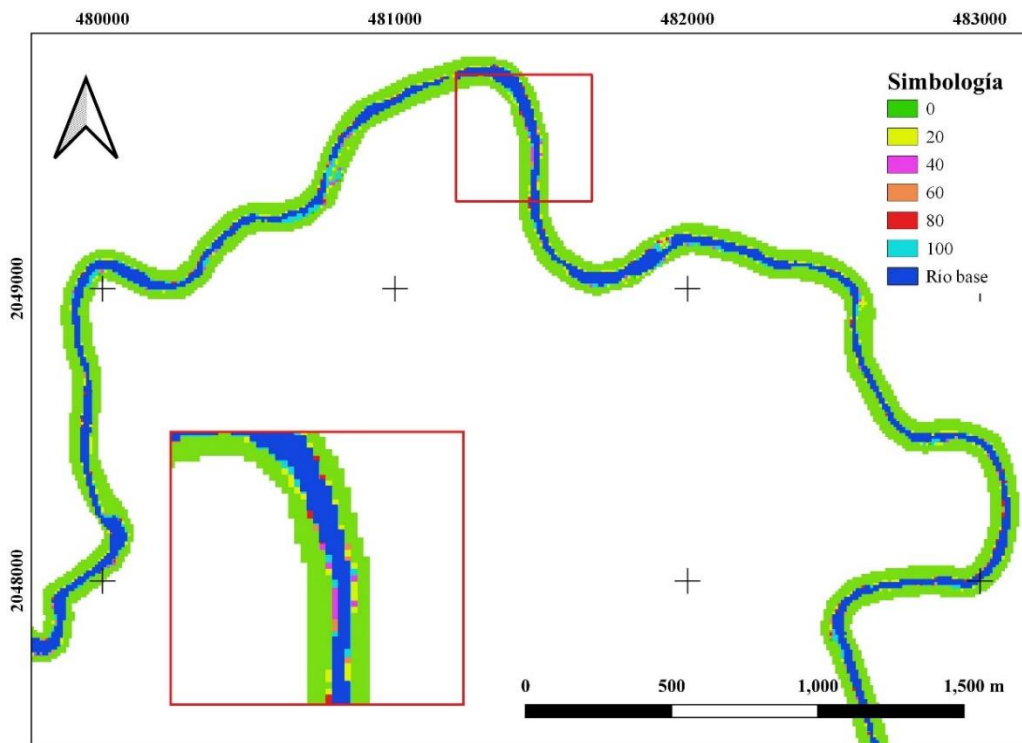


Figura 4.37: Mapa de probabilidad de inundación: Cuenca 1 periodo de seca, estación 18437, $Tr=10$ años.

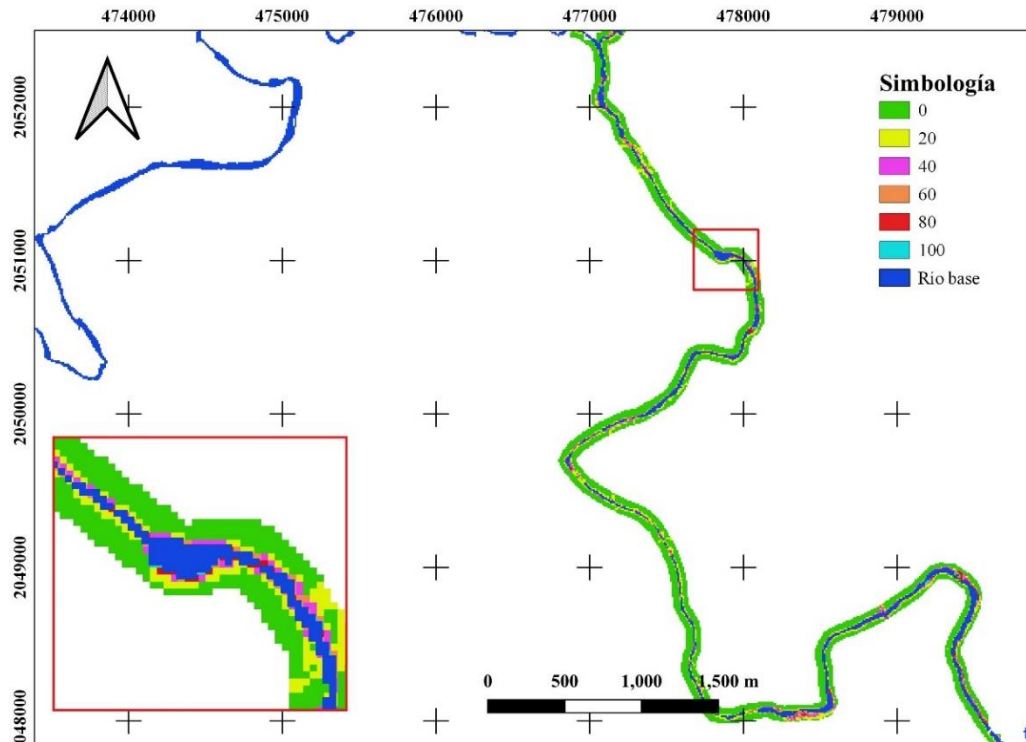


Figura 4.38: Mapa de probabilidad de inundación: Cuenca 2 periodo de lluvia, estación 18437, $Tr=10$ años.

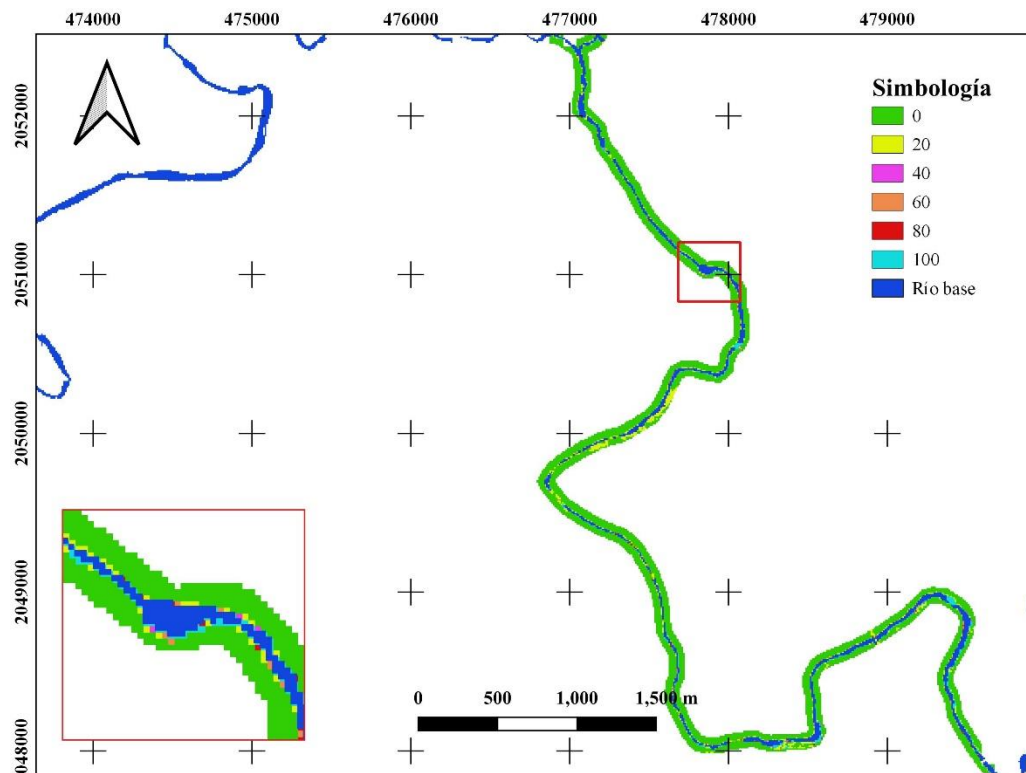


Figura 4.39: Mapa de probabilidad de inundación: Cuenca 2 periodo de seca, estación 18437, $Tr=10$ años.

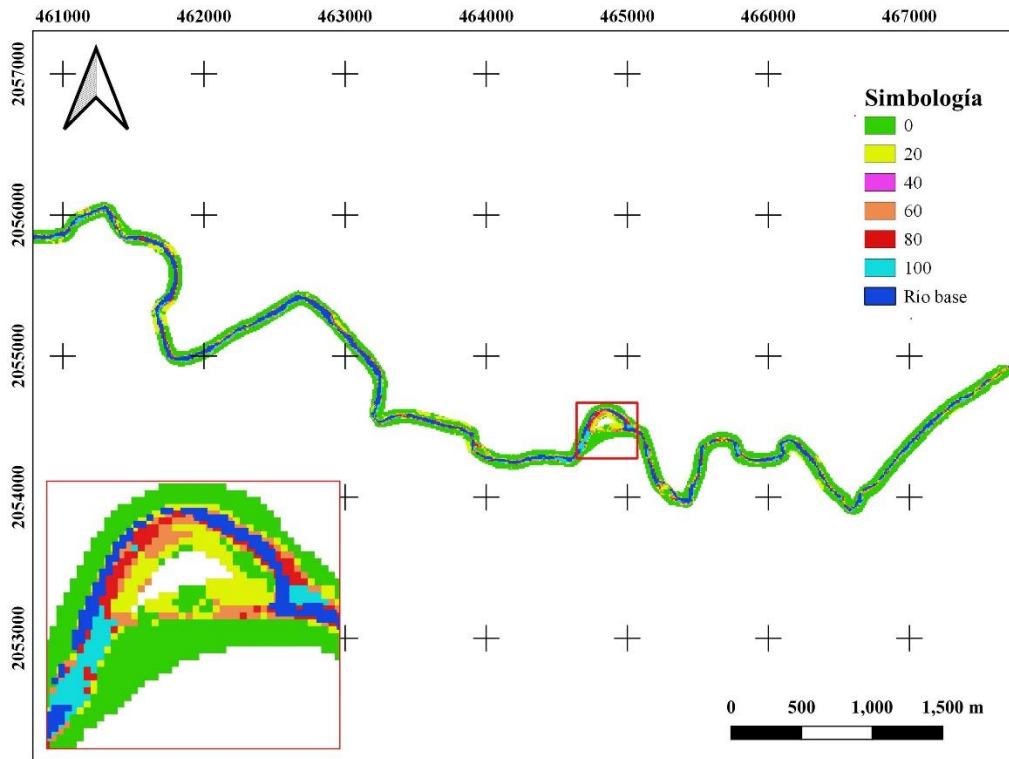


Figura 4.40: Mapa de probabilidad de inundación: Cuenca 4 periodo de lluvia, estación 18232, $Tr=10$ años.

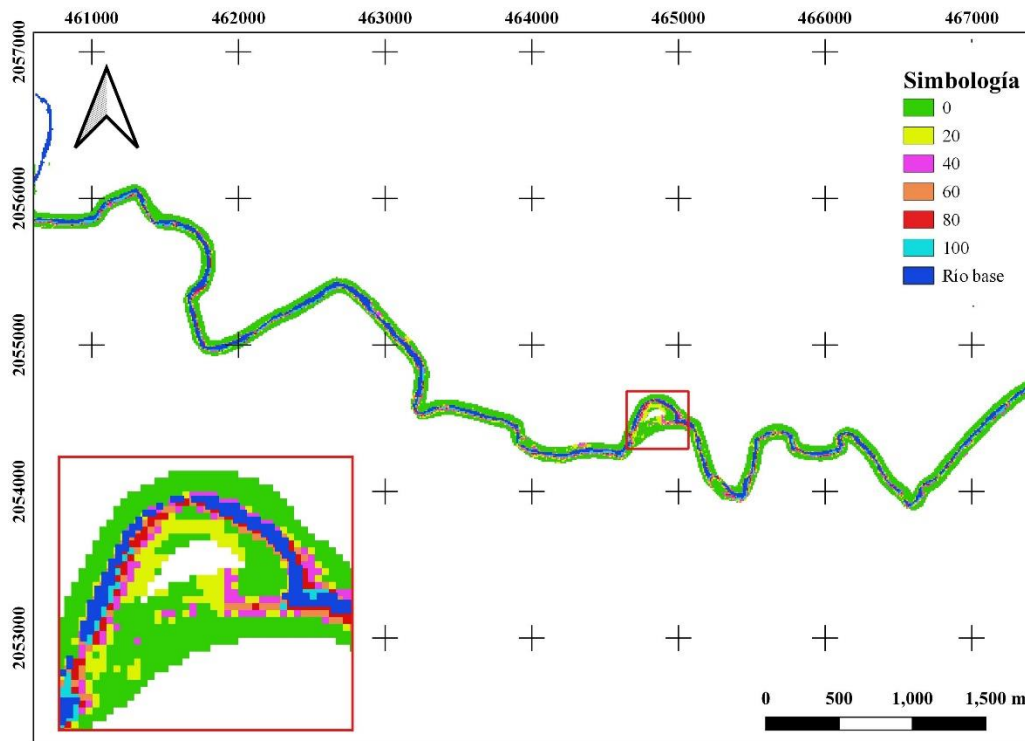


Figura 4.41: Mapa de probabilidad de inundación: Cuenca 4 periodo de seca, estación 18232, $Tr=10$ años.

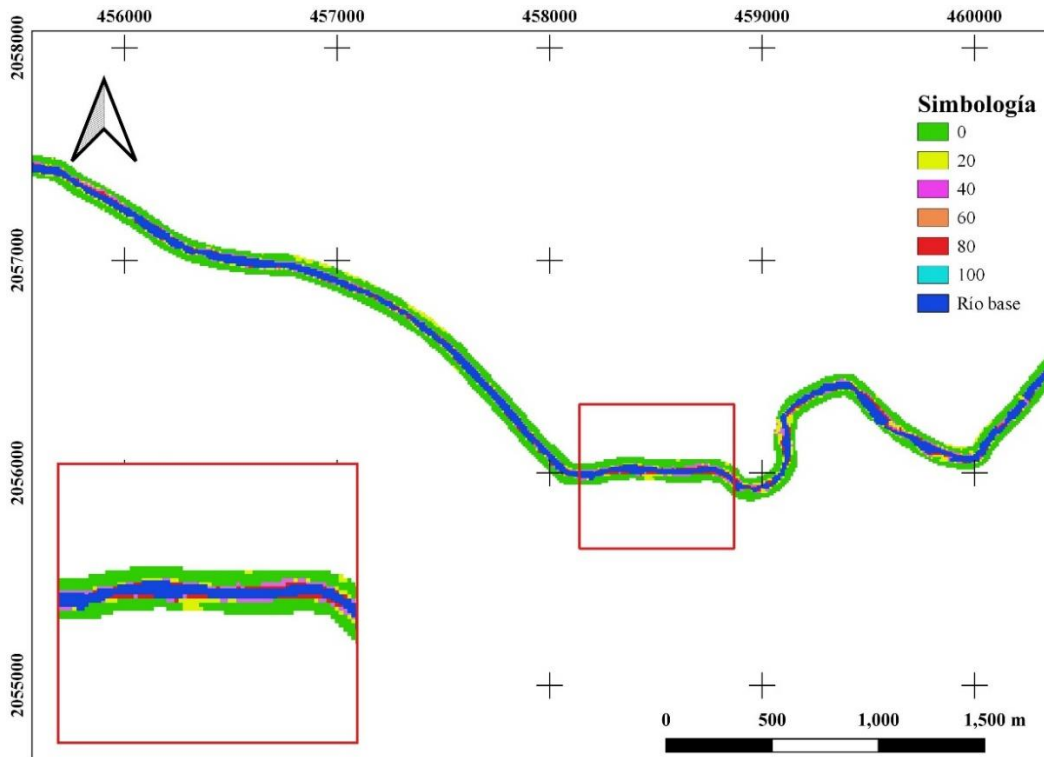


Figura 4.42: Mapa de probabilidad de inundación: Cuenca 5 periodo de lluvia, estación 18232, $Tr=10$ años.

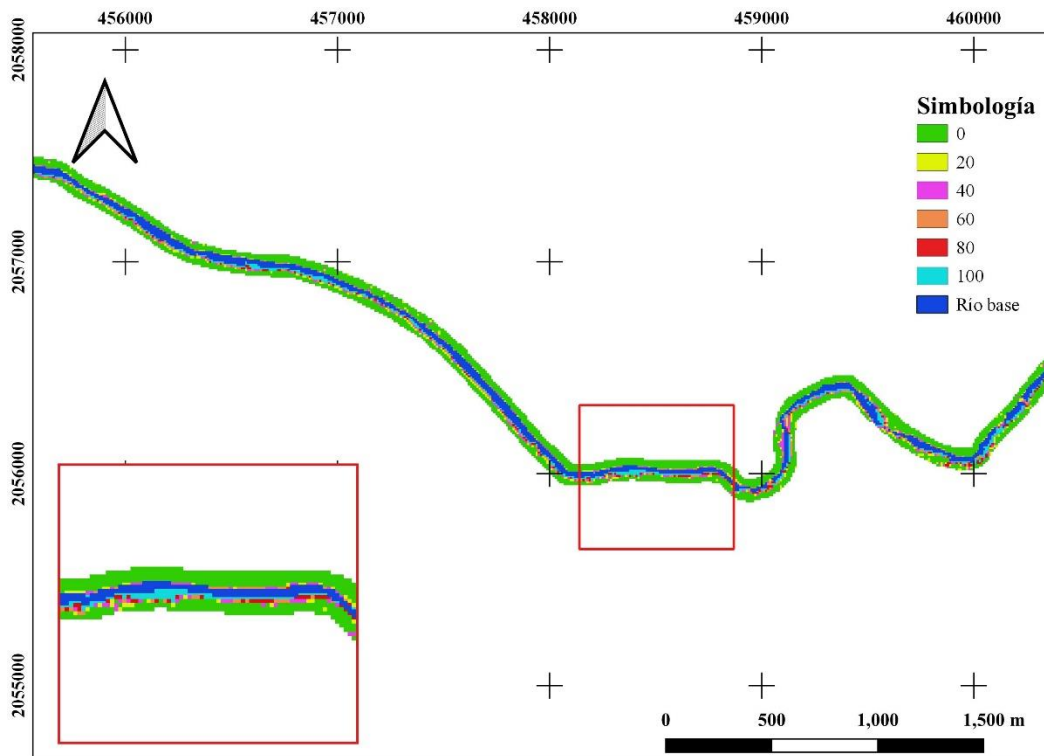


Figura 4.43: Mapa de probabilidad de inundación: Cuenca 5 periodo de seca, estación 18232, $Tr=10$ años.

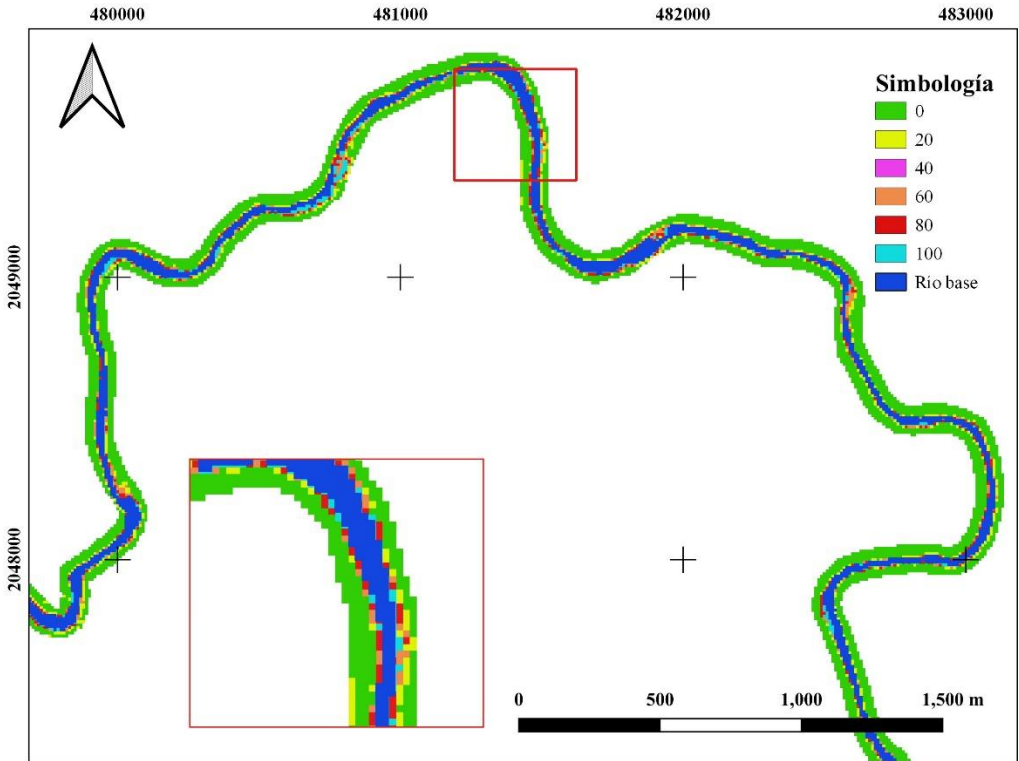


Figura 4.44: Mapa de probabilidad de inundación: Cuenca 1 periodo de lluvia, estación 18437, $Tr=20$ años.

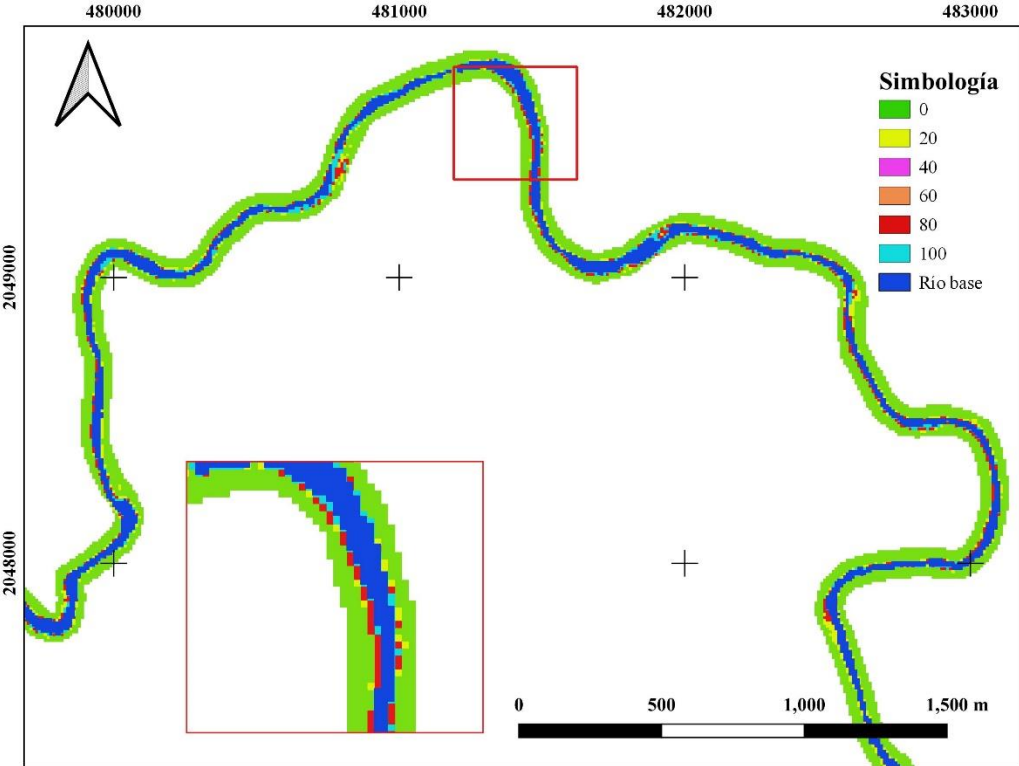


Figura 4.45: Mapa de probabilidad de inundación: Cuenca 1 periodo de seca, estación 18437, $Tr=20$ años.

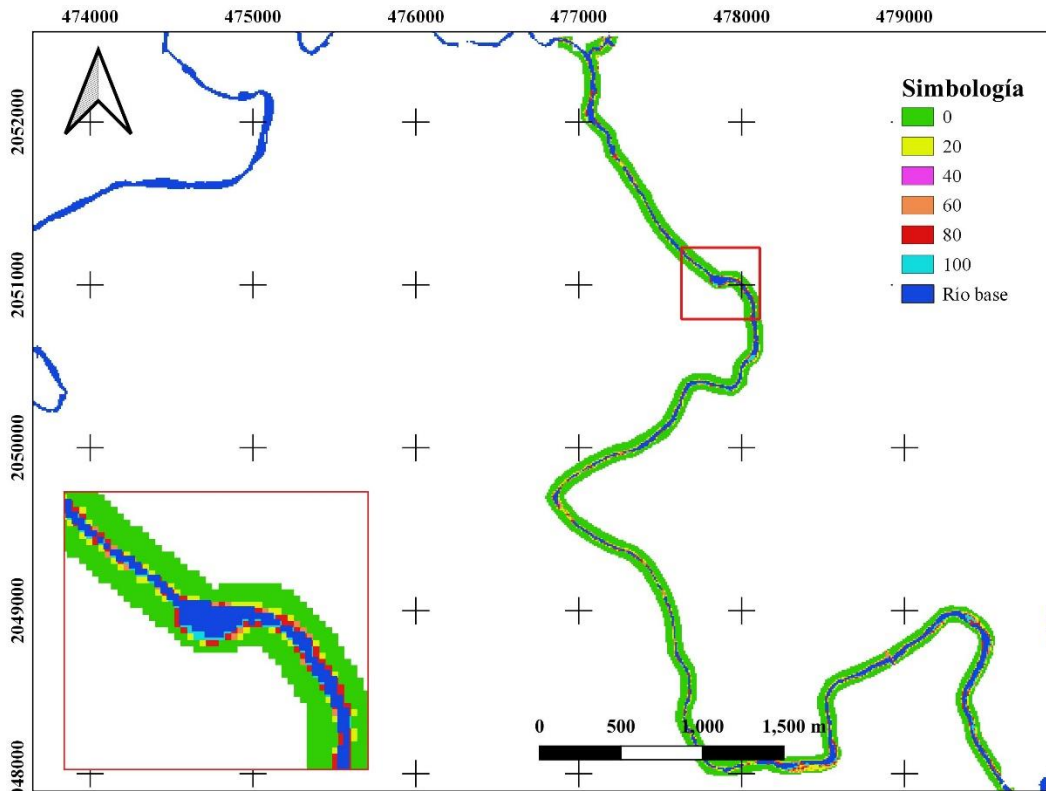


Figura 4.46: Mapa de probabilidad de inundación: Cuenca 2 periodo de lluvia, estación 18437, $Tr=20$ años.

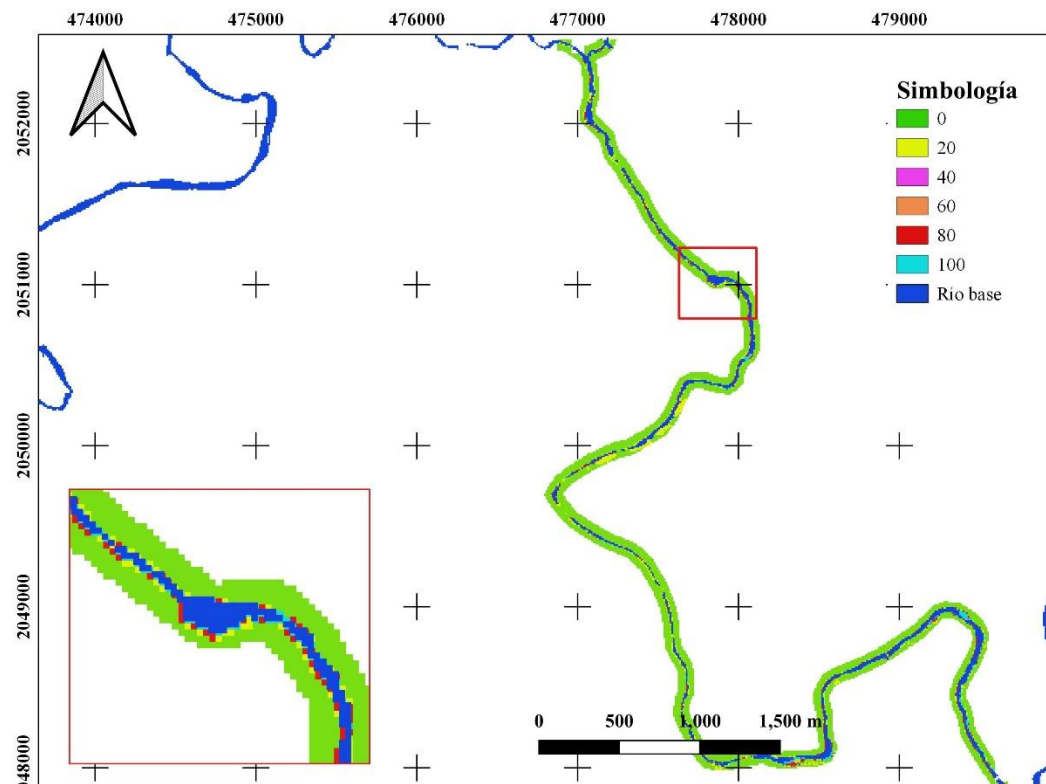


Figura 4.47: Mapa de probabilidad de inundación: Cuenca 2 periodo de seca, estación 18437, $Tr=20$ años.

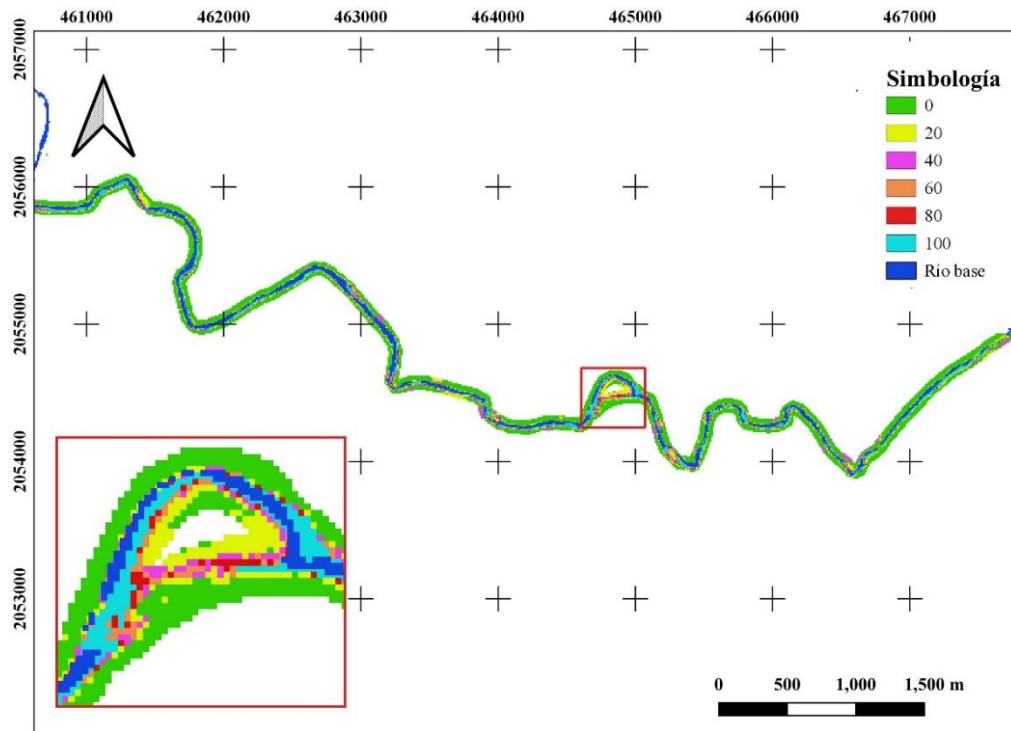


Figura 4.48: Mapa de probabilidad de inundación: Cuenca 4 periodo de lluvia, estación 18232, $Tr=20$ años.

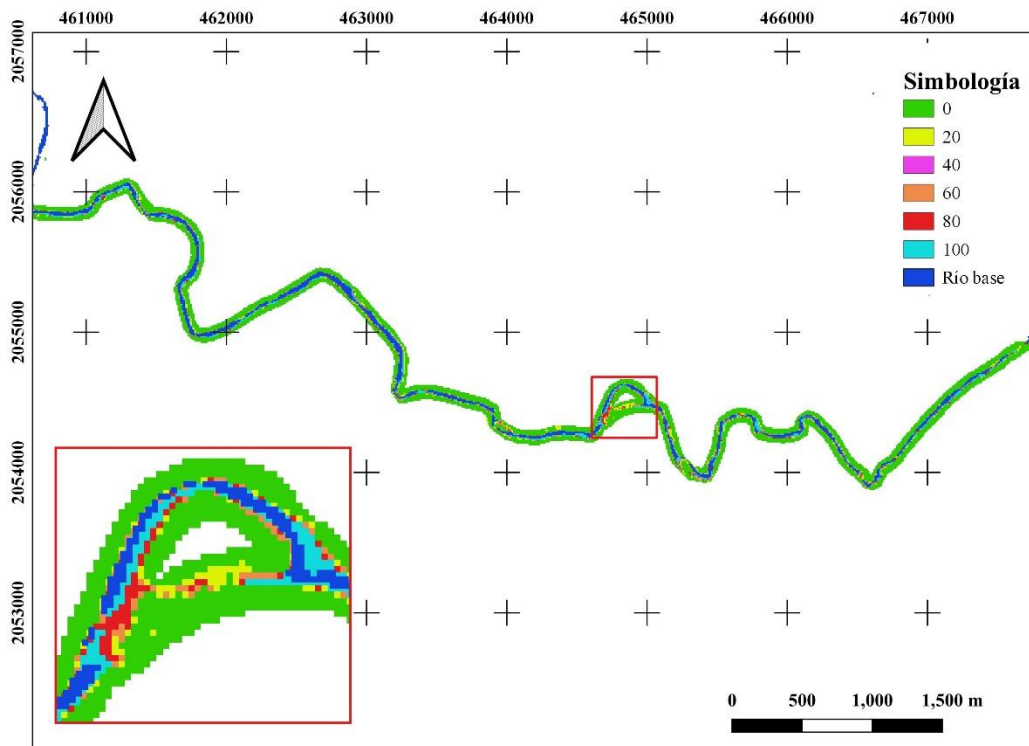


Figura 4.49: Mapa de probabilidad de inundación: Cuenca 4 periodo de seca, estación 18232, $Tr=20$ años.

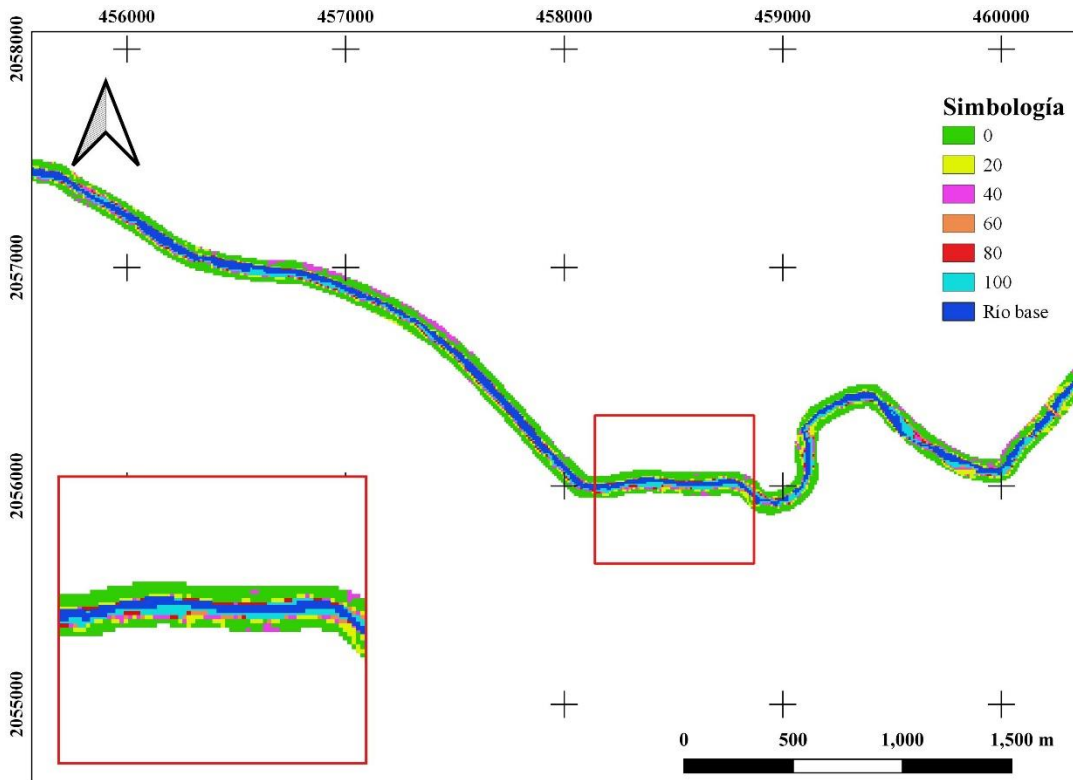


Figura 4.50: Mapa de probabilidad de inundación: Cuenca 5 periodo de lluvia, estación 18232, $Tr=20$ años.

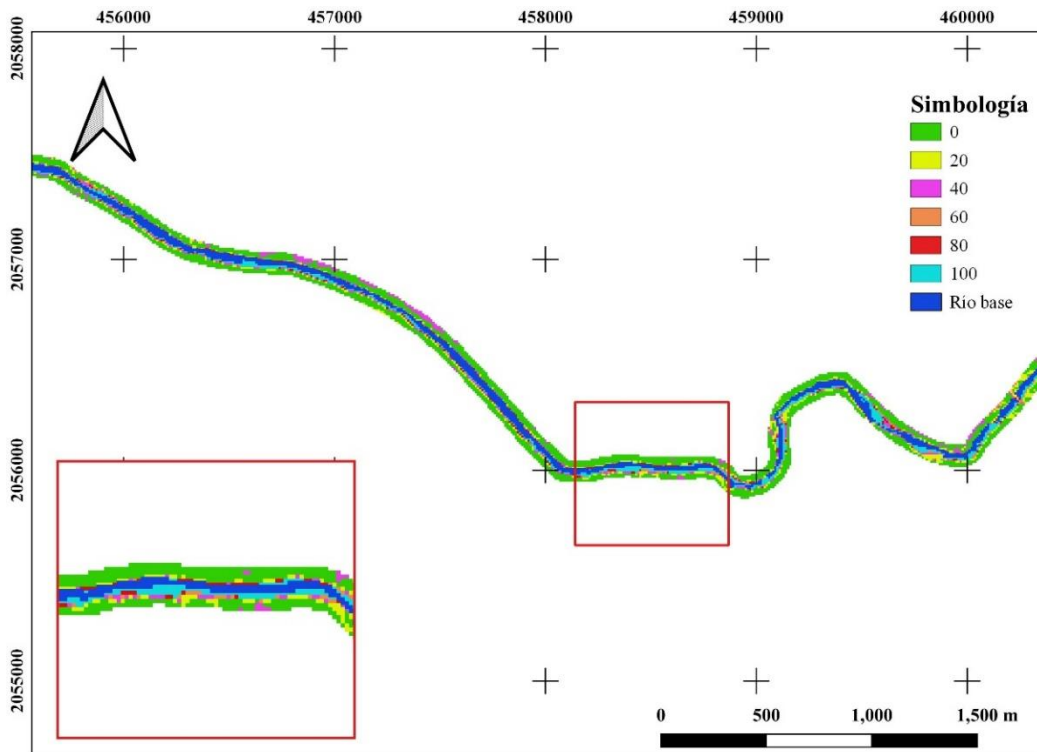


Figura 4.51: Mapa de probabilidad de inundación: Cuenca 5 periodo de seca, estación 18232, $Tr=20$ años.

CONCLUSIONES

La integración de los datos históricos de estaciones hidrométricas y los Sistema de Información Geográfica, proporcionó un medio eficiente para estudiar el río Amacuzac y sus zonas ripiarias. Facilitando la interpretación y manejo de los diferentes elementos involucrados en el comportamiento del río

Se logró conformar una base de datos de 100 imágenes sin nubes en un periodo de 5 años, los cuales fueron concomitantes con los datos de registro de las estaciones hidrométricas 1970-2020. Para los datos hidrométricos se encontró que había alteraciones en la serie de datos por lo cual fue necesario eliminar los datos atípicos. Además, se encontró que los datos de caudal se ajustaron a una distribución de probabilidad Log-Pearson III. Permitiendo con ello asociar los caudales observados a sus respectivas imágenes y determinar sus periodos de retorno a 2, 5, 10 y 20. Con ello también se pudo determinar de manera espacial la probabilidad de inundación en función de su periodo de retorno y su de la temporada (seca y lluviosa).

La comparación entre los algoritmos de clasificación MaxEnt y SVM, permitió explorar desde dos puntos diferentes el comportamiento del río. Se encontró que para el caso de la clasificación del río, la vegetación y la arena el algoritmo SVM arrojaba valores de precisión superiores al del MaxEnt. Siendo el río el que obtuvo la mejor precisión seguido de la vegetación y la arena.

Con el análisis de imágenes de satélite Sentinel 2 a 10 metros de resolución se logró obtener una buena precisión en la clasificación del río. Lo anterior a pesar de lo angosto del río, ya que lo máximo que llega a alcanzar en algunas secciones transversales son 60 metros. Logrando que se distingan correctamente cada una de las clases que se clasificaron durante el transcurso de la investigación.

Los resultados de esta investigación contribuyeron al esclarecimiento de la dinámica que presenta el río Amacuzac al pasar diferentes periodos de tiempos y diferentes regímenes de precipitación. Finalmente se establecen los mapas de probabilidad como herramienta concluyente para describir dicha dinámica, a través de algoritmos de clasificación y con imágenes Sentinel 2. Sirviendo como una herramienta para la gestión ambiental del río, para entender su dinámica y determinar sus cambios en el tiempo. Pudiendo ser este estudio una línea base que analiza el estado y la dinámica del sistema.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Archundia, D., Duwig, C., Spadini, L., Uzu, G., Guédron, S., Morel, M., Cortez, R., Ramos, O.R., Chincheros, J., Martins, J., 2017. How uncontrolled urban expansion increases the contamination of the titicaca lake basin (El Alto, La Paz, Bolivia). *Water. Air. Soil Pollut.* 228, 44.
- Arthington, A.H., Bunn, S.E., Poff, N.L., Naiman, R.J., 2006. The challenge of providing environmental flow rules to sustain river ecosystems. *Ecol. Appl.* 16, 1311–1318.
- Arthington, A.H., Zalucki, J.M., 1998. Comparative evaluation of environmental flow assessment techniques: review of methods.
- Ávila, L.S.V., Vanegas, J.M.B., Villalobos, O.A.R., 2019. Deep Learning aplicado a imágenes satelitales como herramienta de detección de Viviendas Sin Servicio de energía en el caserío Media Luna-Uribia-Guajira.
- Belmar, O., Bruno, D., Martínez-Capel, F., Barquín, J., Velasco, J., 2013. Effects of flow regime alteration on fluvial habitats and riparian quality in a semiarid Mediterranean basin. *Ecol. Indic.* 30, 52–64.
- Bernhardt, E.S., Palmer, M.A., Allan, J., Alexander, G., Barnas, K., Brooks, S., Carr, J., Clayton, S., Dahm, C., Follstad-Shah, J., 2005. Synthesizing US river restoration efforts.
- Bovee, K.D., 1986. Development and evaluation of habitat suitability criteria for use in the instream flow incremental methodology. National Ecology Center, Division of Wildlife and Contaminant Research, Fish
- Bovee, K.D., 1982. A guide to stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology. Western Energy and Land Use Team, Office of Biological Services, Fish and
- Brown, C., King, J., 2003. Environmental flows: concepts and methods. World Bank.
- Bunn, S.E., Arthington, A.H., 2002. Basic Principles and Ecological Consequences of Altered Flow Regimes for Aquatic Biodiversity. *Environ. Manage.* 30, 492–507. <https://doi.org/10.1007/s00267-002-2737-0>
- Carraro, L., Mächler, E., Wüthrich, R., Altermatt, F., 2020. Environmental DNA allows upscaling spatial patterns of biodiversity in freshwater ecosystems. *Nat. Commun.* 11, 1–12.
- Chambers, P., Prepas, E., Hamilton, H., Bothwell, M., 1991. Current velocity and its effect on aquatic macrophytes in flowing waters. *Ecol. Appl.* 1, 249–257.
- Chuvieco, E., 2008. Teledetección ambiental: La observación de la tierra desde el espacio.
- Cobb, D., Galloway, T., Flannagan, J., 1992. Effects of discharge and substrate stability on density and species composition of stream insects. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 49, 1788–1795.
- Colak, E., Chandra, M., Sunar, F., 2019. The use of multi-temporal sentinel satellites in the analysis of land cover/land use changes caused by the nuclear power plant construction. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*
- CONABIO, 2017. Regiones hidrológicas prioritarias [WWW Document]. URL <http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/hidrologicas.html> (accessed 5.26.20).
- Da Costa, M., Moretti Mattos, T., Muñoz Mas, R., Martinez-Capel, F., Fernandes, V., Araújo, F., 2015. Estimación de caudales ecológicos basada en simulación del hábitat físico en un pequeño río del sudeste de Brasil. *Cuad. Soc. Esp. Cienc. For.* 245–252.
- de la Lanza, G.E., González Villela, R., González Mora, I.D., Hernández Pulido, S., 2018. Caudal ecológico de ciertos ríos que descargan al Golfo de México y al Pacífico Mexicano. *Ribagua* 5, 3–15.

- de la Lanza, G.E., Rodríguez, S.A.S., Pérez, J.L.C., 2015. Cálculo del flujo ambiental como sustento para la reserva de agua al ambiente del río Piaxtla, Sinaloa, México. *Investig. Geográficas Bol. Inst. Geogr.* 2015, 25–38.
- Dewan, A., Corner, R., Saleem, A., Rahman, Md Masudur, Haider, M.R., Rahman, Md Mostafizur, Sarker, M.H., 2017. Assessing channel changes of the Ganges-Padma River system in Bangladesh using Landsat and hydrological data. *Geomorphology* 276, 257–279.
- DOF, 2012. Norma Mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012. Que Establ. El Proced. Para Determinación Caudal Ecológico En Cuencas Hidrol. D. Of. Fed. México.
- Felley, J., Felley, S., 1987. Relationships between habitat selection by individuals of a species and patterns of habitat segregation among species: fishes of the Calcasieu drainage. *Community Evol. Ecol. North Am. Stream Fishes Univ. Okla. Press Norman* 61–68.
- Filipek, S.P., Keith, W.E., Giese, J., 1987. Status of the Instream Flow Issue in Arkansas, 1987. *J. Ark. Acad. Sci.* 41, 43–48.
- García, E., 1998. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen : para adaptarlo a las condiciones de la república mexicana / por Enriqueta García.
- Genitha, C.H., Vani, K., 2013. Classification of satellite images using new fuzzy cluster centroid for unsupervised classification algorithm. Presented at the 2013 IEEE Conference on Information & Communication Technologies, IEEE, pp. 203–207.
- Graf, W.L., 1999. Dam nation: A geographic census of American dams and their large-scale hydrologic impacts. *Water Resour. Res.* 35, 1305–1311.
- Guerra, J.M.M., 2018. Influencia del uso del suelo sobre la calidad ecológica de la cuenca del río San Pedro.
- GWP, G.W.P., 2000a. Manejo integrado de recursos hídricos. Stockholm, Sweden: Global Water Partnership.
- Heredia, L.M.C., Carvajal Escobar, Y., Durango, M., Elkin, A., 2006. Enfoques teóricos para definir el caudal ambiental. *Ing. Univ.* 10.
- Hernandez, C.S., Boyd, D.S., Foody, G.M., 2007. Mapping specific habitats from remotely sensed imagery: Support vector machine and support vector data description based classification of coastal saltmarsh habitats.
- Hoppe, R., 1975. Minimum streamflows for fish. Paper distributed at Soils Hydrology Workshop, USGS, Montana State Univ., Jan. 26-30, 1976. Bozeman. Montana.
- Immitzer, M., Vuolo, F., Atzberger, C., 2016. First experience with Sentinel-2 data for crop and tree species classifications in central Europe. *Remote Sens.* 8, 166.
- Immordino, F., Barsanti, M., Candigliota, E., Cocito, S., Delbono, I., Peirano, A., 2019. Application of Sentinel-2 Multispectral Data for Habitat Mapping of Pacific Islands: Palau Republic (Micronesia, Pacific Ocean). *J. Mar. Sci. Eng.* 7, 316.
- INEGI, 2000. Sistema de cuentas nacionales de México.
- Kauffer, E., 2020. Entre una GIRH inconsistente e inseguridades hídricas multiformes: la cuenca transfronteriza del río Hondo en la política mexicana/Between an erratic IWRM and multifaceted water insecurities: the transboundary Hondo River Basin in Mexican policy. *Tecnol. Cienc. Agua* 11, 127–176.
- Kilcoyne, A., Alexander, R., Cox, P., Brownett, J., 2018. Living Maps: Satellite-based Habitat Classification [WWW Document]. ResearchGate. URL https://www.researchgate.net/publication/324703563_Living_Maps_Satellite-based_Habitat_Classification (accessed 3.10.20).

- King, J., Beuster, H., Brown, C., Joubert, A., 2014. Pro-active management: the role of environmental flows in transboundary cooperative planning for the Okavango River system. *Hydrol. Sci. J.* 59, 786–800.
- King, J., Brown, C., Sabet, H., 2003. A scenario-based holistic approach to environmental flow assessments for rivers. *River Res. Appl.* 19, 619–639.
- King, Tharme, R., Brown, C., 1999. Definition and Implementation of Instream flows Southern Waters, University of Cape Town, South Africa. Prep. *Themat. Rev.* II 1.
- Korsgaard, L., 2007. Environmental flows in integrated water resources management: linking flows, services and values.
- Krupiński, M., Lewiński, S., Malinowski, R., 2019. One class SVM for building detection on Sentinel-2 images. Presented at the Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2019, International Society for Optics and Photonics, p. 1117635.
- Leemans, R., De Groot, R., 2003. Millennium Ecosystem Assessment: Ecosystems and human well-being: a framework for assessment.
- Li, W., Guo, Q., 2010. A maximum entropy approach to one-class classification of remote sensing imagery. *Int. J. Remote Sens.* 31, 2227–2235.
- Liu, X., Liu, H., Gong, H., Lin, Z., Lv, S., 2017. Applying the one-class classification method of maxent to detect an invasive plant *Spartina alterniflora* with time-series analysis. *Remote Sens.* 9, 1120.
- Lokgariwar, C., Chopra, R., Smakhtin, V., Bharati, L., O’Keeffe, J., 2014. Including cultural water requirements in environmental flow assessment: an example from the upper Ganga River, India. *Water Int.* 39, 81–96.
- Machado, A.A., 2017. La conservación de ambientes acuáticos: petróleo y otras actividades mineras en Venezuela. Douglas Rodríguez Olarte 189.
- Manandhar, P., Marpu, P.R., 2019. Change Detection and Transfer Learning Approach for Updating the Habitat Maps in UAE. Presented at the IGARSS 2019-2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE, pp. 2427–2430.
- Martínez, S.-M.C., Fernández, Y., J.A., 2006. Indices de alteración hidrológica (IAHRIS 2.2).
- Martínez, Y.V., Villalejo, V.M.G., 2020. Caudal ambiental: herramienta ecohidrológica en la gestión de los recursos hídricos. *Ing. Hidráulica Ambient.* 41, 56–70.
- Meffe, G.K., Sheldon, A.L., 1988. The influence of habitat structure on fish assemblage composition in southeastern blackwater streams. *Am. Midl. Nat.* 225–240.
- Mejía, R.A., 2018. Desarrollo de herramienta Hidro-Informática para estimar el caudal ecológico en cuencas no aforadas.
- Mellor, A., Haywood, A., Jones, S., Wilkes, P., 2012. Forest classification using random forests with multisource remote sensing and ancillary GIS data. Presented at the Proceedings of 16th Australian Remote Sensing and Photogrammetry Conference, Melbourne, VIC, Australia.
- Miller, R., Minckley, W., Norris, S., Gach, M., 2009. Peces dulceacuícolas de México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Sociedad Ictiológica Mexicana, AC.
- Mojica, H.M., 2012. Estructura y dinámica de una comunidad de peces bajo la influencia de un componente invasor.
- Mora, G., de la Lanza Espino, G., Navarro, R.S., 2009. Propuesta de caudal ecológico en la cuenca Copalita-Zimatán-Huatulco. *World Wildl. Found. Fund. Río Arronte Gonzalo* 13–19.
- Moreno, Z.G.T., 2019. Estudio multitemporal de la cobertura vegetal de los ecosistemas de la zona sur de la provincia de Chimborazo a través de imágenes satelitales “Landsat 8”.
- Newbury, R., Gaboury, M., 1993. Exploration and rehabilitation of hydraulic habitats in streams using principles of fluvial behaviour. *Freshw. Biol.* 29, 195–210.

- Olden, J.D., Poff, N., 2003. Redundancy and the choice of hydrologic indices for characterizing streamflow regimes. *River Res. Appl.* 19, 101–121.
- Palmer, M., Bernhardt, E., Chornesky, E., Collins, S., Dobson, A., Duke, C., Gold, B., Jacobson, R., Kingsland, S., Kranz, R., 2004. Ecology for a crowded planet.
- Petus, C., Waterhouse, J., Lewis, S., Vacher, M., Tracey, D., Devlin, M., 2019. A flood of information: Using Sentinel-3 water colour products to assure continuity in the monitoring of water quality trends in the Great Barrier Reef (Australia). *J. Environ. Manage.* 248, 109255.
- Poff, N., Allan, J., Bain, M., Karr, J., Pres-tegaard, K., Richter, B., Sparks, R., Stromberg, J., 1997. The natural flow regime: a paradigm for river con-servation and restoration. *BioScience* 47 769–784.
- Poff, N., L., Zimmerman, J.K.H., 2009. Ecological Responses to Altered Flow Regimes: A Literature Review to Inform the Science and Management of Environmental Flows.
- Poff, N., Zimmerman, J., 2009. Ecological impacts of altered flow regimes: A meta-analysis to inform environmental flow management. *Freshw. Biol.*
- Poff, N.L., Richter, B.D., Arthington, A.H., Bunn, S.E., Naiman, R.J., Kendy, E., Acreman, M., Apse, C., Bledsoe, B.P., Freeman, M.C., 2010. The ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA): a new framework for developing regional environmental flow standards. *Freshw. Biol.* 55, 147–170.
- Pratiwi, Y., Widodo, E., 2017. Comparison Of Maximum Entropy and Support Vector Machine Methods For Sentiment Analysis Of Peralite Product Through Twitter Social Network. *Int. J. Adv. Electron. Comput. Sci.* 10–14.
- Pusey, B., Kennard, M., Arthington, A., 2000. Discharge variability and the development of predictive models relating stream fish assemblage structure to habitat in northeastern Australia. *Ecol. Freshw. Fish* 9, 30–50.
- Reiser, D.W., Wesche, T.A., Estes, C., 1989. Status of instream flow legislation and practices in North America. *Fisheries* 14, 22–29.
- Richter, B.D., Baumgartner, J.V., Powell, J., Braun, D.P., 1996. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems. *Conserv. Biol.* 10, 1163–1174.
- Rodríguez, D.M., Martínez-Rivera, L.M., Mercado-Silva, N., Jalón-Lastra, D.G. de, Rio, T.-D., Marchamalo-Sacristán, M., Mora-Orozco, C.D. la, 2017. Propuesta de caudal ecológico en la cuenca del Río Ayuquila-Armería en el Occidente de México. *Lat. Am. J. Aquat. Res.* 45, 1017–1030.
- Roy, D.P., Wulder, M.A., Loveland, T.R., Woodcock, C., Allen, R.G., Anderson, M.C., Helder, D., Irons, J.R., Johnson, D.M., Kennedy, R., 2014. Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sens. Environ.* 145, 154–172.
- Sanderson, R., 1982. An introduction to remote sensing [WWW Document]. ResearchGate. URL https://www.researchgate.net/publication/226233143_An_introduction_to_remote_sensing (accessed 3.18.20).
- Shi, P., Liu, J., Yang, T., Xu, C.-Y., Feng, J., Yong, B., Cui, T., Li, Z., Li, S., 2019. New Methods for the Assessment of Flow Regime Alteration under Climate Change and Human Disturbance. *Water* 11, 2435.
- Shirmohammadi, B., Malekian, A., Salajegheh, A., Taheri, B., Azarnivand, H., Malek, Z., Verburg, P.H., 2020. Scenario analysis for integrated water resources management under future land use change in the Urmia Lake region, Iran. *Land Use Policy* 90, 104299.
- Soares, D., 2018. Recursos hídricos de la cuenca del Amacuzac. *Inven. Génesis Cult. Univ.*
- Sparks, R.E., 1995. Need for ecosystem management of large rivers and their floodplains. *BioScience* 45, 168–182.
- Speed, R., Binney, J., Posey, B., Catford, J., 2011. Policy measures, mechanisms and framework for addressing environmental flows. *Int. Water Cent. Brisb.*

- Tanaka, K., Fujihara, Y., Hoshikawa, K., Fujii, H., 2019. Development of a flood water level estimation method using satellite images and a digital elevation model for the Mekong floodplain. *Hydrol. Sci. J.* 64, 241–253.
- Tennant, D., 1976. Instream flow regimes for fish, wildlife, recreation, and related environmental resources.
- Tharme, R.E., 2003. A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers. *River Res. Appl.* 19, 397–441.
- Torres, A.E.E., Wehncke, E.V., Medellín, X.L., Almanza, B.M., 2016. Fifty years of environmental changes of the Amacuzac riparian ecosystem: a social perceptions and historical ecology approach. *Ethnobiol. Conserv.* 5.
- Tu, M.-C., Smith, P., Filippi, A.M., 2018. Hybrid forward-selection method-based water-quality estimation via combining Landsat TM, ETM+, and OLI/TIRS images and ancillary environmental data. *PloS One* 13.
- Villela, R.G., Tarabay, A.B., 2007. Estudio Comparativo de Tres Metodologías para el Manejo y Cálculo de Caudales Ambientales en el Río Santiago, Nayarit, México.
- Wetmore, S.H., Mackay, R.J., Newbury, R.W., 1990. Characterization of the hydraulic habitat of *Brachycentrus occidentalis*, a filter-feeding caddisfly. *J. North Am. Benthol. Soc.* 9, 157–169.
- Xiong, W., Huang, X., Chen, Y., Fu, R., Du, X., Chen, X., Zhan, A., 2020. Zooplankton biodiversity monitoring in polluted freshwater ecosystems: a technical review. *Environ. Sci. Ecotechnology* 1, 100008.
- Xu, E., Zeng, O., 2017. Predicting Amazon Deforestation with Satellite Images.
- Zuzolo, D., Cicchella, D., Catani, V., Giaccio, L., Guagliardi, I., Esposito, L., De Vivo, B., 2017. Assessment of potentially harmful elements pollution in the Calore River basin (Southern Italy). *Environ. Geochem. Health* 39, 531–548.

Anexo 1: Resultados de análisis de frecuencia estación 18232.

Fecha	Caudal de 30 días antes (m ³ /s)	Porbabilidad de no excedencia	Probabilidad de excedencia	Periodo de retorno
12/4/2015	26.18	0.76	0.24	4.15
12/18/2016	10.83	0.52	0.48	2.09
12/28/2016	9.94	0.50	0.50	1.99
1/7/2017	8.73	0.46	0.54	1.85
1/27/2017	4.56	0.28	0.72	1.39
2/6/2017	3.95	0.25	0.75	1.33
3/8/2017	2.93	0.18	0.82	1.22
5/7/2017	1.06	0.05	0.95	1.05
7/6/2017	46.31	0.87	0.13	7.64
8/15/2017	25.21	0.75	0.25	4.01
10/14/2017	126.52	0.97	0.03	31.66
11/3/2017	81.98	0.94	0.06	16.20
11/23/2017	12.85	0.57	0.43	2.33
12/8/2017	11.29	0.53	0.47	2.15
12/18/2017	10.36	0.51	0.49	2.04
12/28/2017	9.62	0.49	0.51	1.95
1/2/2018	9.39	0.48	0.52	1.92
1/7/2018	9.17	0.47	0.53	1.90
1/27/2018	5.88	0.35	0.65	1.53
2/16/2018	2.64	0.16	0.84	1.19
2/21/2018	2.59	0.16	0.84	1.19
2/26/2018	2.38	0.14	0.86	1.17
3/3/2018	2.15	0.13	0.87	1.15
3/23/2018	1.46	0.08	0.92	1.08
3/28/2018	1.29	0.07	0.93	1.07
4/2/2018	1.23	0.06	0.94	1.06
4/7/2018	1.27	0.06	0.94	1.07
4/17/2018	1.21	0.06	0.94	1.06
4/22/2018	1.34	0.07	0.93	1.07
4/27/2018	1.48	0.08	0.92	1.09
5/17/2018	3.27	0.20	0.80	1.26
5/22/2018	3.97	0.25	0.75	1.33
7/6/2018	76.83	0.93	0.07	14.77
7/21/2018	65.31	0.92	0.08	11.80
7/26/2018	55.77	0.90	0.10	9.60
7/31/2018	38.44	0.84	0.16	6.16
8/10/2018	30.99	0.80	0.20	4.90
8/15/2018	28.33	0.78	0.22	4.48

Referencias bibliográficas

8/20/2018	28.50	0.78	0.22	4.51
8/25/2018	47.15	0.87	0.13	7.80
9/9/2018	89.53	0.95	0.05	18.43
9/14/2018	99.45	0.95	0.05	21.60
10/4/2018	93.13	0.95	0.05	19.55
10/9/2018	78.33	0.93	0.07	15.18
10/19/2018	71.60	0.93	0.07	13.38
10/24/2018	75.34	0.93	0.07	14.36
11/8/2018	62.75	0.91	0.09	11.19
11/23/2018	19.47	0.69	0.31	3.19
12/8/2018	11.22	0.53	0.47	2.14
12/13/2018	11.37	0.54	0.46	2.16
12/18/2018	9.73	0.49	0.51	1.96
12/23/2018	8.73	0.46	0.54	1.85
2/1/2019	2.52	0.15	0.85	1.18
2/6/2019	2.14	0.13	0.87	1.15
2/11/2019	2.05	0.12	0.88	1.14
2/16/2019	2.71	0.17	0.83	1.20
2/21/2019	2.99	0.19	0.81	1.23
2/26/2019	3.16	0.20	0.80	1.24
3/8/2019	3.51	0.22	0.78	1.28
3/13/2019	3.84	0.24	0.76	1.31
3/18/2019	3.32	0.21	0.79	1.26
4/2/2019	2.38	0.14	0.86	1.17
4/7/2019	2.01	0.12	0.88	1.13
4/12/2019	1.99	0.12	0.88	1.13
4/17/2019	1.93	0.11	0.89	1.13
4/22/2019	2.20	0.13	0.87	1.15
5/7/2019	2.73	0.17	0.83	1.20
6/1/2019	6.15	0.36	0.64	1.56
6/21/2019	25.94	0.76	0.24	4.12
8/15/2019	18.89	0.68	0.32	3.11
8/25/2019	26.24	0.76	0.24	4.16
8/30/2019	27.90	0.77	0.23	4.41
10/14/2019	70.22	0.92	0.08	13.02
11/3/2019	76.91	0.93	0.07	14.79
11/8/2019	65.03	0.91	0.09	11.73
11/23/2019	43.75	0.86	0.14	7.14
12/28/2019	7.89	0.43	0.57	1.75
2/16/2020	2.30	0.14	0.86	1.16
2/21/2020	2.11	0.12	0.88	1.14
2/26/2020	1.99	0.12	0.88	1.13
3/2/2020	1.95	0.11	0.89	1.13
3/12/2020	1.94	0.11	0.89	1.13

Referencias bibliográficas

3/17/2020	1.92	0.11	0.89	1.13
3/22/2020	1.87	0.11	0.89	1.12
4/1/2020	1.84	0.11	0.89	1.12
4/6/2020	1.80	0.10	0.90	1.11
4/21/2020	1.66	0.09	0.91	1.10
5/1/2020	1.35	0.07	0.93	1.07
5/31/2020	1.21	0.06	0.94	1.06
6/5/2020	1.22	0.06	0.94	1.06
9/13/2020	49.08	0.88	0.12	8.19
9/23/2020	35.98	0.62	0.38	2.63
10/13/2020	37.80	0.63	0.37	2.70
10/18/2020	53.44	0.88	0.12	8.33
10/28/2020	68.65	0.93	0.07	14.29
11/7/2020	69.45	0.94	0.06	16.67
11/12/2020	75.09	0.97	0.03	33.33
11/27/2020	79.76	0.98	0.02	50.00
12/2/2020	10.90	0.56	0.44	2.27
12/7/2020	8.34	0.43	0.57	1.75
12/4/2015	26.18	0.76	0.24	4.15
12/18/2016	10.83	0.52	0.48	2.09
12/28/2016	9.94	0.50	0.50	1.99
1/7/2017	8.73	0.46	0.54	1.85
1/27/2017	4.56	0.28	0.72	1.39
2/6/2017	3.95	0.25	0.75	1.33
3/8/2017	2.93	0.18	0.82	1.22
5/7/2017	1.06	0.05	0.95	1.05
7/6/2017	46.31	0.87	0.13	7.64
8/15/2017	25.21	0.75	0.25	4.01
10/14/2017	126.52	0.97	0.03	31.66
11/3/2017	81.98	0.94	0.06	16.20
11/23/2017	12.85	0.57	0.43	2.33
12/8/2017	11.29	0.53	0.47	2.15
12/18/2017	10.36	0.51	0.49	2.04
12/28/2017	9.62	0.49	0.51	1.95
1/2/2018	9.39	0.48	0.52	1.92
1/7/2018	9.17	0.47	0.53	1.90
1/27/2018	5.88	0.35	0.65	1.53
2/16/2018	2.64	0.16	0.84	1.19
2/21/2018	2.59	0.16	0.84	1.19
2/26/2018	2.38	0.14	0.86	1.17
3/3/2018	2.15	0.13	0.87	1.15
3/23/2018	1.46	0.08	0.92	1.08
3/28/2018	1.29	0.07	0.93	1.07
4/2/2018	1.23	0.06	0.94	1.06

Referencias bibliográficas

4/7/2018	1.27	0.06	0.94	1.07
4/17/2018	1.21	0.06	0.94	1.06
4/22/2018	1.34	0.07	0.93	1.07
4/27/2018	1.48	0.08	0.92	1.09
5/17/2018	3.27	0.20	0.80	1.26
5/22/2018	3.97	0.25	0.75	1.33

Anexo 2: Resultados de análisis de frecuencia estación 18437

Fecha	Caudal de 30 días antes (m3/s)	Porbabilidad de no excedencia	Probabilidad de excedencia	Periodo de retorno
12/4/2015	31.46	0.55	0.45	2.21
12/18/2016	30.44	0.53	0.47	2.12
12/28/2016	27.61	0.47	0.53	1.90
1/7/2017	23.89	0.39	0.61	1.65
1/27/2017	19.43	0.29	0.71	1.40
2/6/2017	18.08	0.25	0.75	1.34
3/8/2017	14.85	0.17	0.83	1.21
5/7/2017	13.67	0.15	0.85	1.17
7/6/2017	54.07	0.81	0.19	5.30
8/15/2017	54.96	0.82	0.18	5.47
10/14/2017	96.68	0.96	0.04	22.49
11/3/2017	64.08	0.87	0.13	7.63
11/23/2017	37.38	0.64	0.36	2.79
12/8/2017	31.79	0.55	0.45	2.24
12/18/2017	30.04	0.52	0.48	2.09
12/28/2017	29.28	0.51	0.49	2.03
1/2/2018	28.81	0.50	0.50	1.99
1/7/2018	28.69	0.50	0.50	1.98
1/27/2018	27.05	0.46	0.54	1.86
2/16/2018	27.00	0.46	0.54	1.86
2/21/2018	26.85	0.46	0.54	1.85
2/26/2018	26.60	0.45	0.55	1.83
3/3/2018	26.31	0.45	0.55	1.81
3/23/2018	24.26	0.40	0.60	1.67
3/28/2018	23.70	0.39	0.61	1.64
4/2/2018	23.74	0.39	0.61	1.64
4/7/2018	21.03	0.33	0.67	1.49
4/17/2018	18.39	0.26	0.74	1.35
4/22/2018	17.52	0.24	0.76	1.32
4/27/2018	20.93	0.32	0.68	1.48
5/17/2018	22.85	0.37	0.63	1.59
5/22/2018	24.56	0.41	0.59	1.69
7/6/2018	87.26	0.94	0.06	16.73
7/21/2018	65.19	0.87	0.13	7.94
7/26/2018	55.06	0.82	0.18	5.50
7/31/2018	35.50	0.61	0.39	2.59
8/10/2018	31.94	0.56	0.44	2.25
8/15/2018	31.71	0.55	0.45	2.23
8/20/2018	34.23	0.59	0.41	2.46
8/25/2018	42.86	0.71	0.29	3.46

Referencias bibliográficas

9/9/2018	77.10	0.92	0.08	11.99
9/14/2018	80.12	0.92	0.08	13.26
10/4/2018	73.17	0.90	0.10	10.49
10/9/2018	59.33	0.84	0.16	6.43
10/19/2018	43.60	0.72	0.28	3.56
10/24/2018	41.45	0.69	0.31	3.27
11/8/2018	37.11	0.64	0.36	2.76
11/23/2018	24.54	0.41	0.59	1.69
12/8/2018	15.88	0.20	0.80	1.25
12/13/2018	15.93	0.20	0.80	1.25
12/18/2018	13.29	0.14	0.86	1.16
12/23/2018	13.20	0.13	0.87	1.16
2/1/2019	16.97	0.23	0.77	1.29
2/6/2019	14.43	0.16	0.84	1.20
2/11/2019	11.52	0.10	0.90	1.11
2/16/2019	11.84	0.10	0.90	1.12
2/21/2019	11.10	0.09	0.91	1.10
2/26/2019	9.74	0.06	0.94	1.07
3/8/2019	8.99	0.05	0.95	1.05
3/13/2019	8.76	0.05	0.95	1.05
3/18/2019	8.39	0.04	0.96	1.04
4/2/2019	7.38	0.03	0.97	1.03
4/7/2019	6.65	0.02	0.98	1.02
4/12/2019	5.81	0.01	0.99	1.01
4/17/2019	4.99	0.01	0.99	1.01
4/22/2019	4.50	0.00	1.00	1.00
5/7/2019	4.21	0.00	1.00	1.00
6/1/2019	7.77	0.03	0.97	1.03
6/21/2019	29.76	0.52	0.48	2.07
8/15/2019	32.68	0.57	0.43	2.32
8/25/2019	44.28	0.73	0.27	3.65
8/30/2019	45.11	0.73	0.27	3.77
10/14/2019	67.14	0.88	0.12	8.51
11/3/2019	107.39	0.97	0.03	31.03
11/8/2019	106.58	0.97	0.03	30.31
11/23/2019	67.47	0.88	0.12	8.61
12/28/2019	16.67	0.22	0.78	1.28
2/16/2020	9.52	0.06	0.94	1.06
2/21/2020	8.85	0.05	0.95	1.05
2/26/2020	8.34	0.04	0.96	1.04
3/2/2020	8.06	0.04	0.96	1.04
3/12/2020	7.50	0.03	0.97	1.03
3/17/2020	7.48	0.03	0.97	1.03

Referencias bibliográficas

3/22/2020	7.38	0.03	0.97	1.03
4/1/2020	7.09	0.02	0.98	1.02
4/6/2020	6.81	0.02	0.98	1.02
4/21/2020	5.80	0.01	0.99	1.01
5/1/2020	5.39	0.01	0.99	1.01
5/31/2020	5.23	0.01	0.99	1.01
6/5/2020	5.18	0.01	0.99	1.01
9/13/2020	65.22	0.87	0.13	7.95
9/23/2020	69.89	0.89	0.11	9.09
10/13/2020	75.07	0.92	0.08	12.50
10/18/2020	112.43	0.97	0.03	35.93
10/28/2020	123.90	0.97	0.03	33.33
11/7/2020	125.54	0.98	0.02	50.00
11/12/2020	136.78	0.99	0.01	100.00
11/27/2020	124.78	0.97	0.03	33.33
12/2/2020	86.90	0.88	0.12	8.33
12/7/2020	34.86	0.58	0.42	2.38
