



MEDIO AMBIENTE
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES



**COORDINACIÓN DE GOBERNANZA DEL AGUA Y
FORTALECIMIENTO DE CAPACIDADES**

**SUBCOORDINACIÓN DE POSGRADO Y
EDUCACIÓN CONTINUA**

T E S I S

**“El Caudal Ambiental como Criterio de Evaluación
del Potencial Minihidroeléctrico.”**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
Maestro en Ciencias y Tecnología del Agua.

PRESENTA
Alejandro Cisneros Silva.

Tutor: Dra. María Antonieta Gómez Balandra.

Jiutepec, Morelos

2023

F.C4.03.44.1





Con fundamento en los artículos 21 y 27 de la Ley Federal del Derecho de Autor y como titular de los derechos moral y patrimoniales de la obra titulada **“El Caudal Ambiental como Criterio de Evaluación del Potencial Minihidroeléctrico.”** otorgo de manera gratuita y permanente al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, autorización para que fijen la obra en cualquier medio, incluido el electrónico, y la divulguen entre su personal, estudiantes o terceras personas, sin que pueda percibir por tal divulgación una contraprestación.

Alejandro Cisneros Silva

Jiutepec, Morelos a 28 de septiembre de 2023

F.C4.03.43.1





COMITÉ TUTORAL

Dra. María Del Pilar Saldaña Fabela

Dr. Juan Gabriel García Maldonado

M. en I. Ana Palacios Fonseca

M. en I. José Avidán Bravo Jácome

Directora de Tesis

Dra. María Antonieta Gómez Balandra

Jiutepec, Morelos a 28 de septiembre de 2023
Instituto Mexicano de Tecnología de Agua



Agradecimientos Personales

A Luz María sobre todo y todos, a Doña Teba ayer, hoy y siempre.

A Chata, Albita, Franco, Eva, Sergio, Carlos y Socorro.

A Sergio, Maritza, Daniel, Verónica, Franco, Erick, Jaime y David.

A Raúl, Samael, Coco, Jaime, Lupita, El George, Alejandra, Brenda, Mariana, Tito, Marta y Alex tocayo.

Agradecimientos Académicos

A la Dra. María Antonieta Gómez Balandra por su paciencia y dedicación, a los doctores Pilar Saldaña Fabela y Juan Gabriel García Maldonado, a los maestros Ana Palacios Fonseca y José Avidán Bravo Jácome por apoyarme en el desarrollo de esta tesis. También al M. en I. Jorge Cortés Alfaro por ayudarme con toda su ciencia y a la M. en G. Socorro Flores Gutiérrez por su geomática. A todo el cuerpo docente y administrativo del IMTA, especialmente al Dr. Ariosto Aguilar Chávez y a Belem Arroyo Ramírez por su apoyo constante.





No Control

By Bad Religion

Greg Graffin/Brett Gurewitz

Culture was the seed of proliferation, but it's gotten melded
Into an inharmonic whole to an inharmonic whole
Consciousness has plagued us and we cannot shake it
Though we think we're in control
Though we think we're in control
Questions that besiege us in life are testament of our helplessness
There's no vestige of a beginning, no prospect of an end
When we all disintegrate, it will all happen again, yeah
Time is so rock solid in the minds of the hordes
But they can't explain why it should slip away
Explain why it should slip away
History and future are the comforts of our curiosity
But here we are rooted in the present day
Rooted in the present day
Questions that besiege us in life are testament of our helplessness
There's no vestige of beginning, no prospect of an end
When we all disintegrate, it will all happen again, yeah
If you came to conquer, you'll be king for a day
But you too will deteriorate and quickly fade away
And believe these words you hear when you think your path is clear
We have no control
We have no control
We have no control
We do not understand, you have no control
You are not in command
You have no control
We have no control
No control, no control
You have no control



Contenido

1	Resumen.....	11
2	Introducción.....	12
3	Justificación.....	16
4	Objetivo General	20
4.1	Objetivos Particulares.....	20
5	Marco Teórico	21
5.1	Régimen de flujo.....	21
5.1.1	Días de caudal cero.....	23
5.1.2	Curva de duración de caudales	23
5.1.3	Mínimos para un día	24
5.1.4	Caudales extremadamente bajos	24
5.1.5	Duración de los caudales extremadamente bajos	25
5.1.6	Frecuencia de los caudales extremadamente bajos.....	25
5.1.7	Caudales diarios promedio	25
5.1.8	Caudales bajos mensuales.....	26
5.2	Centrales hidroeléctricas	27
5.2.1	Centrales minihidroeléctricas.....	29
5.3	Caudales ambientales y caudales ecológicos	32
5.4	Estudios de prefactibilidad.....	34
5.5	Potencial minihidroeléctrico	38
5.6	Potencial hidroeléctrico y caudales mínimos ecológicos	40
5.7	Esquemas de obras.....	40
5.7.1	Sistemas de carga baja y alta.....	42

5.7.2	Esquemas con embalse	43
5.7.3	Esquemas con derivación.....	44
5.7.4	Esquemas al hilo del agua o de paso	47
5.8	Turbinas.....	48
5.8.1	Turbinas Pelton	49
5.8.2	Turbinas de flujo cruzado (Michell- Banki).....	50
5.8.3	Turbinas Francis.....	51
5.8.4	Turbinas Kaplan	52
5.8.5	Selección de turbinas	53
6	Área de estudio	56
7	Metodología	60
7.1	Análisis geoespaciales	60
7.1.1	Modelo digital de elevación	60
7.1.2	Sistemas de Información Geográfica.....	60
7.1.3	Orden del río Verde	61
7.1.4	Delimitación de cuencas.....	62
7.2	Análisis hidrológicos	64
7.2.1	Estaciones hidrométricas.....	64
7.2.2	Perfil longitudinal del río Verde y sus tributarios.....	65
7.2.3	Herramientas Hidrológicas	66
7.2.4	Días con caudal cero	72
7.2.5	Curva de duración de caudales	72
7.2.6	Caudales extremadamente bajos	73
7.2.7	Duración de caudales extremadamente bajos.....	74
7.2.8	Frecuencia de caudales extremadamente bajos	74

7.2.9	Caudal diario promedio.....	76
7.3	Determinación del potencial minihidroeléctrico.....	77
7.4	Caudales Bajos Mensuales (CBM) y potencial minihidroeléctrico	78
7.5	Curva de duración de caudales utilizando el caudal promedio diario menos los caudales bajos mensuales.....	80
7.6	Determinación de equipos adecuados para cada estación con potencial minihidroeléctrico.....	82
8	Resultados	84
8.1	Análisis geoespaciales	84
8.1.1	Orden del río Verde	84
8.1.2	Delimitación de cuencas.....	84
8.2	Análisis hidrológicos	87
8.2.1	Estaciones hidrométricas.....	87
8.2.2	Perfil longitudinal del río Verde y sus tributarios principales.....	89
8.2.3	Hidrología de la cuenca del río Verde.....	93
8.3	Resultados por estación hidrométrica	96
8.3.1	Estación hidrométrica Juquila.....	96
8.3.2	Estación hidrométrica Oaxaca Atoyac.....	96
8.3.3	Estación hidrométrica Oaxaca Salado.....	98
8.3.4	Estación hidrométrica Zimatlán	101
8.3.5	Estación hidrométrica Tlapacoyan.....	102
8.3.6	Estación hidrométrica Yutama.....	105
8.3.7	Estación hidrométrica Nduave.....	109
8.3.8	Estación hidrométrica Paso Ancho.....	114
8.3.9	Estación hidrométrica Yutacua	122

8.3.10	Estación hidrométrica Nusutia	129
8.3.11	Estación hidrométrica Ixtayutla.....	137
8.3.12	Estación hidrométrica El Carrizo.....	144
8.3.13	Estación hidrométrica Paso de la Reina	151
8.4	Determinación de equipos para cada sitio.....	159
9	Discusión.....	160
9.1	Características geográficas e hidrológicas de la cuenca del río Verde... 160	
9.2	Potencial minihidroeléctrico y caudales ambientales en las estaciones hidrométricas seleccionadas	163
10	Conclusiones	171
11	Referencias.....	174

Figuras

Figura 1.	Casa de máquinas al pie de presa (Sandoval Erazo, 2018).	44
Figura 2.	Esquemas de derivación mediante canal (Ball et al., 2020; Sandoval Erazo, 2018)	46
Figura 3.	Diagrama de tomas para caudal ambiental y para generación.	46
Figura 4.	Esquemas a hilo de agua (Ball et al., 2020).....	47
Figura 5.	Turbina Pelton de uno o varios inyectores (Ball et al., 2020).....	49
Figura 6.	Turbina de flujo cruzado o Michell- Banki (Ball et al., 2020).	50
Figura 7.	Turbina Francis (Avelino Pérez, 2016; Zegarra Macedo, 2020).....	51
Figura 8.	Turbina Kaplan (Avelino Pérez, 2016; Sandoval Erazo, 2018)	53
Figura 9.	Grafica para selección de turbinas a partir del caudal de diseño y la altura aprovechable (Sandoval Erazo, 2018).....	54
Figura 10.	Área de uso óptimo para cada grupo de turbinas (Sandoval Erazo, 2018).	55
Figura 11.	Proceso para obtener el orden del río Verde en ArcMap 10.3.	62
Figura 12.	Proceso de delimitación de cuencas en ArcMap 10.3.	64

Figura 13. Determinación del perfil longitudinal del río Verde en ArcMap 10.3....	65
Figura 14. Indicadores de alteración hidrológica (IHA), Versión 7.1.	66
Figura 15. Archivo formato .CSV.	68
Figura 16. Importación de datos hidrológicos del programa IHA, estación Oaxaca Atoyac.....	68
Figura 17. Proyecto de la estación Oaxaca Atoyac	69
Figura 18. Propiedades del análisis del programa IHA.	70
Figura 19. Cuadro resumen de resultados para la estación Oaxaca Atoyac.	71
Figura 20. Caudales bajos mensuales de la estación Oaxaca Atoyac.....	71
Figura 21. Obtención de la gráfica de días con caudal cero.	72
Figura 22. Obtención de las gráficas de curvas de duración de caudales.	73
Figura 23. Obtención de la gráfica de caudales mínimos para 1 día	74
Figura 24. Obtención de la gráfica de duración de caudales extremadamente bajos.	75
Figura 25. Obtención de la gráfica de frecuencia de caudales extremadamente bajos.	75
Figura 26. Cálculo del caudal promedio para cada día del año de la estación El Carrizo.	76
Figura 27. Cálculo del potencial minihidroeléctrico de la estación El Carrizo.	78
Figura 28. Cuadro de resultados del IHA de la estación Yutama, pestaña pct (percentiles) y valores del percentil 50 del cuadro EFC Monthly Low Flows.....	79
Figura 29. Cálculo del caudal disponible restando el CBM y recálculo de la potencia disponible.....	80
Figura 30. Cálculo de la frecuencia acumulada para curva de duración de caudales.	81
Figura 31. Cálculo de la frecuencia acumulada para curva de duración de caudales.	82
Figura 32. Grafica para la selección de turbinas, el área sombreada indica la zona con las turbinas que se ajustan a las características de cada sitio.	83
Figura 33. Perfil del río Salado.....	90
Figura 34. Perfil del río Atoyac.....	91

Figura 35. Perfil del río Yutama	91
Figura 36. Perfil del río Putla.....	92
Figura 37. Perfil del río Verde.	93
Figura 38. Caudales medios y días con caudal cero de las estaciones hidrométricas de la cuenca del río Verde.	94
Figura 39. Estaciones con caudales cero de la cuenca del río Verde.....	95
Figura 40. Localización de la estación Oaxaca Atoyac en el perfil del río Atoyac.	97
Figura 41. Días de caudal 0 para la estación Oaxaca Atoyac.....	98
Figura 42. Curva de duración de caudales de la estación Oaxaca Atoyac.	98
Figura 43. Localización de la estación Oaxaca Salado en el perfil del río Salado.	99
Figura 44. Días de caudal 0 en la estación Oaxaca Salado.....	100
Figura 45. Curva de duración de caudales de la estación Oaxaca Salado.....	100
Figura 46. Localización de la estación Zimatlán en el perfil del río Atoyac.	101
Figura 47. Días de caudal 0 en la estación Zimatlán.	102
Figura 48. Curva de duración de caudales estación Zimatlán.	102
Figura 49. Localización de la estación Tlapacoyan en el perfil del río Atoyac. ..	103
Figura 50. Días de caudal 0 en la estación Tlapacoyan.....	104
Figura 51. Curva de duración de caudales de la estación Tlapacoyan.....	104
Figura 52. Perfil del río Yutama y localización de la estación Yutama.	105
Figura 53. Curva de duración de caudales de la estación Yutama.	106
Figura 54 Caudales extremadamente bajos en la estación Yutama. Gráficas de caudal extremadamente bajo, duración y frecuencia.	107
Figura 55. Logaritmo del caudal diario promedio de la estación Yutama.....	108
Figura 56. Caudales bajos mensuales de la estación Yutama.....	108
Figura 57. Curva de duración de caudales de la estación Yutama restando el caudal bajo mensual al caudal diario promedio.....	109
Figura 58. Perfil del río Yutama y localización de la estación Nduave.....	110
Figura 59. Curva de duración de caudales a estación Nduave.....	111

Figura 60 Caudales extremadamente bajos en la estación Nduave. Gráficas de caudal extremadamente bajo, duración y frecuencia. 112

Figura 61. Logaritmo del caudal promedio diario de la estación Nduave..... 113

Figura 62. Caudales bajos mensuales de la estación Nduave..... 113

Figura 63. Curva de duración de caudales de la estación Nduave restando el caudal bajo mensual al caudal diario promedio..... 114

Figura 64. Localización de la estación Paso Ancho en el perfil del río Atoyac... 115

Figura 65. Curva de duración de caudales de la estación Paso Ancho. 116

Figura 66. Caudales extremadamente bajos en la estación Paso Ancho. Gráficas de caudal extremadamente bajo, duración y frecuencia. 117

Figura 67. Logaritmo del caudal diario promedio de la estación Paso Ancho.... 118

Figura 68. Caudales bajos mensuales de la estación Paso Ancho..... 118

Figura 69. Curva de duración de caudales de la estación Paso Ancho restando el caudal bajo mensual al caudal diario promedio. 119

Figura 70. Potencia diaria promedio o potencia bruta de la estación Paso Ancho. 120

.....

Figura 71. Potencia bruta y potencia menos Caudal Bajo Mensual (CBM)) para cada escenario de carga de la estación Paso Ancho. 121

Figura 72. Localización de la estación Yutacua en el perfil del río Verde. 122

Figura 73. Curva de duración de caudales de la estación Yutacua. 123

Figura 74. Caudales extremadamente bajos para la estación Yutacua. Gráficas de Caudal extremadamente bajo, duración y frecuencia. 124

Figura 75. Caudal diario promedio de la estación Yutacua..... 125

Figura 76. Caudales Bajos Mensuales de la estación Yutacua. 125

Figura 77. Curva de duración de caudales de la estación Yutacua restando el caudal bajo mensual al caudal diario promedio. 126

Figura 78. Potencia diaria promedio o bruta de la estación Yutacua. 127

Figura 79. Potencia bruta y potencia menos Caudal Bajo Mensual (CBM)) para cada escenario de carga de la estación Yutacua..... 128

Figura 80. Localización de la estación Nusutia en el perfil del río Putla. 129

Figura 81. Curva de duración de caudales de la estación Nusutia. 130

Figura 82. Caudales extremadamente bajos para la estación Nusutia. Gráficas de caudal extremadamente bajo, duración y frecuencia.	131
Figura 83. Caudal diario promedio de la estación Nusutia.	132
Figura 84. Caudales Bajos Mensuales para la estación Nusutia.	133
Figura 85. Curva de duración de caudales de la estación Nusutia restando el caudal bajo mensual al caudal diario promedio.	134
Figura 86. Potencia diaria promedio o bruta de la estación Nusutia.	135
Figura 87. Potencia bruta y potencia menos Caudal Bajo Mensual (CBM) para cada escenario de carga de la estación Nusutia.	136
Figura 88. Localización de la estación Ixtayutla en el perfil del río Verde.	137
Figura 89. Curva de duración de caudales de la estación Ixtayutla.	138
Figura 90. Caudales extremadamente bajos para la estación Ixtayutla. Gráficas de Caudal extremadamente bajo, duración y frecuencia.	139
Figura 91. Caudal diario promedio de la estación Ixtayutla.	140
Figura 92. Caudales bajos mensuales para la estación Ixtayutla.	140
Figura 93. Curva de duración de caudales de la estación Ixtayutla restando el caudal bajo mensual al caudal diario promedio.	141
Figura 94. Potencia diaria promedio o bruta de la estación Ixtayutla.	142
Figura 95. Potencia bruta y potencia menos Caudal Bajo Mensual (CBM)) para cada escenario de carga de la estación Ixtayutla.	143
Figura 96. Localización de la estación El Carrizo en el perfil del río Verde.	144
Figura 97. Curva de duración de caudales de la estación El Carrizo.	145
Figura 98. Caudales extremadamente bajos para la estación El Carrizo. Gráficas de caudal extremadamente bajo, duración y frecuencia.	146
Figura 99. Caudal diario promedio de la estación El Carrizo.	147
Figura 100. Caudales Bajos Mensuales de la estación El Carrizo.	148
Figura 101. Curva de duración de caudales de la estación El Carrizo restando el caudal bajo mensual al caudal diario promedio.	148
Figura 102. Potencia diaria promedio o bruta de la estación El Carrizo.	149
Figura 103. Potencia diaria promedio y potencia menos Caudal Bajo Mensual para cada escenario de carga de la estación El Carrizo.	150

Figura 104. Localización de la estación Paso de la Reina en el perfil del río Verde. 151

Figura 105. Curva de Duración de Caudal de la estación Paso de la Reina..... 152

Figura 106. Caudales extremadamente bajos para la estación Paso de la Reina. Gráficas de caudal extremadamente bajo, duración y frecuencia..... 153

Figura 107. Caudal diario promedio de la estación Paso de la Reina..... 154

Figura 108. Caudales bajos mensuales de la estación Paso de la Reina..... 155

Figura 109. Curva de duración de caudales de la estación Paso de la Reina restando el caudal bajo mensual al caudal diario promedio..... 156

Figura 110. Potencia diaria promedio o bruta de la estación Paso de la Reina . 157

Figura 111. Potencia diaria promedio y potencia menos Caudal Bajo Mensual para cada escenario de carga de la estación Paso de la Reina..... 158

Figura 112. Determinación de equipos para cada estación. 159

Mapas

Mapa 1. Cauces principales, región hidrológica y municipios de importancia para el río Verde. 59

Mapa 2. Orden del río Verde y sus tributarios..... 85

Mapa 3. Subcuencas redefinidas para la cuenca del río Verde. 86

Mapa 4. Estaciones hidrométricas de la cuenca del río Verde. 88

Tablas

Tabla 1. Importancia ecológica, presión de uso, estado de conservación deseado y objetivo ambiental de las subcuencas del río Verde 56

Tabla 2. Estaciones hidrométricas de la cuenca del río Verde. En los años de registro, los años faltantes se muestran entre paréntesis. 89

Tabla 3. Caudales promedio y caudales pico altos y bajos a partir de los datos históricos..... 96

Tabla 4. Máximos y mínimos de potencial bruto de la estación Paso Ancho..... 120



Tabla 5. Máximos y mínimos de potencial bruto de la estación Yutacua. 127
Tabla 6. Máximos y mínimos de potencial bruto de la estación Nusutia. 134
Tabla 7. Máximos y mínimos de potencial bruto de la estación Ixtayutla. 142
Tabla 8. Máximos y mínimos de potencial bruto de la estación El Carrizo. 149
Tabla 9. Máximos y mínimos de potencial bruto de la estación Paso de la Reina.
..... 156



1 Resumen

Históricamente los ríos han sido un recurso natural muy apreciado, en consecuencia, han sido modificados desde la antigüedad con el fin de abastecer a las poblaciones de agua, regar cultivos y en la industria (Dyson et al., 2003). Uno de los usos más recientes para los ríos es el de generar electricidad, este tipo de energía es considerada limpia al no consumir hidrocarburos, aunque no está libre de impactos sobre el ambiente. Entre los impactos producidos por las hidroeléctricas, incluyendo a las minicentrales, se encuentra la alteración del régimen natural de caudal, que es una de las características ecológicas más importantes de los ríos y que es calificada como una variable maestra en estos sistemas (Poff et al., 1997). Como respuesta a las alteraciones del régimen natural se comenzó a utilizar el concepto de caudal ecológico para reservar un gasto mínimo de flujo para mantener los ecosistemas (Tennant, 1976). Posteriormente, el concepto evolucionó a caudal ambiental, reconociendo la importancia de reproducir el régimen de caudal e integrando las necesidades ambientales con los usos humanos de los ríos (ELOHA, 2010). En este trabajo se revisan las características del régimen hidrológico de la cuenca del río Verde en Oaxaca para determinar los requerimientos de caudal ambiental en sitios con potencial minihidroeléctrico y utilizarlos como base para calcular el caudal o volumen disponible para generación. De esta forma, se contribuirá a una toma de mejores decisiones desde la perspectiva ambiental, mejorando el manejo de los ríos, conservando los ecosistemas y optimizando los posibles diseños de las centrales hidroeléctricas.

2 Introducción

Desde la antigüedad el manejo de los recursos hídricos se realizaba desde la perspectiva del suministro humano, procurando maximizar el abastecimiento para el uso doméstico, la agricultura y la industria (Dyson et al., 2003). Es en este sentido que las actividades humanas que generan contaminación, la extracción de agua y las modificaciones de los caudales, a través de las canales y presas, han sido las principales fuentes de alteración de los ríos y de su calidad del agua (Arévalo-Mejía et al., 2020). De todas las actividades humanas que pueden alterar los ríos, una de las más importantes es la construcción de presas, las cuales tienen diferentes fines como el control de inundaciones, el abastecimiento de agua, el riego y la generación de electricidad (Chen et al., 2020; Egré y Milewski, 2002a; Poff et al., 1997)

Entre los distintos tipos de presas destacan las dedicadas a la generación eléctrica, según Chen, *et al.* (2020), existen en el mundo alrededor de 50,000 presas mayores a los 15 m de altura y probablemente existan millones de embalses menores. A nivel mundial se calcula una capacidad instalada de 1,247 GW y en 2016 la capacidad de generación promedio fue de 4,185 TWh. Aunque bajo los acuerdos de París (Organización de las Naciones Unidas, 2015) las hidroeléctricas son una opción de generación de energía limpia, sustentable y barata, aún existen muchos impactos importantes relacionados a este tipo de presas, como son las alteraciones sobre la temporalidad de flujo, los niveles de agua, la temperatura, el transporte de sedimentos e incluso, la producción de gases de efecto invernadero (Steinmetz y Sundqvist, 2014).

El proceso de construcción de una central hidroeléctrica inicia con su planeación, apoyada en una serie de estudios denominados de prefactibilidad, los cuales identificarán

las condiciones generales del sitio donde se planea construir una instalación de este tipo. A partir de estos estudios se diseñan las estructuras y los sistemas que serán utilizados, se calculan las condiciones de operación para la planta y se evalúan los impactos generales según los diferentes diseños en el medio ambiente. Estos estudios tienen como principales ejes la topografía, la hidrología, el análisis ambiental, los procedimientos de autorización y la evaluación económica (Rivas Carpio, 2013). Para los proyectos es de vital importancia que estos estudios se realicen con el mayor detalle posible, debido a que de estos dependerá la identificación y mitigación de los impactos ambientales, los costos y los posibles problemas críticos que pueden surgir al construir y operar una central (Ball et al., 2020).

Entre los estudios de prefactibilidad, probablemente los más importantes son los hidrológicos y topográficos debido a que la combinación del caudal y la pendiente determinarán la energía que puede generarse en un sitio determinado (Sandoval Erazo, 2018). La disponibilidad del agua y las condiciones del terreno determinarán si un proyecto resulta factible, así como el esquema de obra más adecuado para las condiciones en cada sitio y las necesidades de generación de la zona. De esta manera, la determinación de potencial hidroenergético es uno de los componentes clave para este proceso de evaluación (Belmonte et al., 2008)

Desde el punto de vista ecológico, la característica más importante de los ríos es la variabilidad de los flujos naturales, la cual genera ambientes dinámicos que diversifican las interacciones biológicas, provocando alta biodiversidad. En consecuencia, es posible afirmar que las especies acuáticas han evolucionado con base en los flujos estacionales, sus variaciones y relación con otros ciclos (Poff et al., 1997; Steinmetz y Sundqvist, 2014).

Es en este contexto que la alteración al régimen hidrológico provocada por la construcción de presas resulta tan importante, dado que el régimen de flujo es un eje en el mantenimiento de la integridad ecológica de los sistemas lóticos (Poff et al., 1997).

Como respuesta a los impactos sobre el régimen natural surgió el concepto de caudal ecológico, el cual se refiere a la cantidad y calidad del agua que fluye en un río, sus patrones de distribución temporal y también su valor cultural y estético, en un intento para garantizar la funcionalidad ecosistémica (Arias y Terneus, 2012; Rudra, 2018). En México, la norma mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012 define caudal ambiental como “la cantidad, calidad y variación del gasto o de los niveles de agua reservada para preservar servicios ambientales, componentes, funciones, procesos y la resiliencia de ecosistemas acuáticos y terrestres que dependen de procesos hidrológicos, geomorfológicos, ecológicos y sociales” (Diario Oficial de la Federación México, 2012).

La disponibilidad del agua en forma de caudales ecológicos y ambientales es crucial para mantener el equilibrio ecológico en los ríos y sus sistemas asociados y, por otra parte, el agua es el principal insumo de las centrales minihidroeléctricas. En consecuencia, el diseño de las centrales minihidroeléctricas debe establecerse con base en los caudales ambientales, determinando la potencia disponible en los sitios seleccionados a partir de los caudales disponibles una vez cuantificadas las necesidades ambientales o ecológicas. Para realizar el cálculo de la potencia en bruto y la potencia disponible restando los caudales ambientales, es necesario conocer las condiciones hidrométricas, topográficas, así como los caudales ecológicos durante los periodos con caudales bajos. De esta manera es posible evaluar el efecto de los caudales ambientales sobre el potencial de las centrales minihidroeléctricas para un punto determinado o estación en el cauce del río.

Para realizar este estudio se seleccionó la cuenca del río Verde, Oaxaca, debido a su alta importancia ecológica, baja presión de uso y su muy buen estado de conservación, atributos establecidos en la NMX-AA-159-SCFI-2012 (Diario Oficial de la Federación México, 2012). Además, los ríos Verde y Atoyac cuentan con 14 estaciones hidrométricas, repartidas en la parte alta del río Atoyac y media-baja del río Verde, cubriendo una parte importante de la cuenca, facilitando la obtención de datos de caudal a lo largo de la cuenca. Por otra parte, existen varios estudios previos desarrollados en esta cuenca, especialmente sobre caudal ecológico (Gómez-Balandra *et al.*, 2014; Torres, 2012). Desde el punto de vista de la generación eléctrica, la Comisión Federal de Electricidad realizó estudios de factibilidad para el megaproyecto “Aprovechamiento Hidráulico de Usos Múltiples Paso de la Reina, Oaxaca” y la empresa Generación ENERSI, SA de CV está desarrollando el proyecto Minihidroeléctrico denominado Proyecto Hidroeléctrico para la Generación de Energía Renovable P.H. río Verde, Oaxaca (SEMARNAT, 2019). Todos estos antecedentes contribuyeron al desarrollo de la presente investigación.

3 Justificación

El régimen natural de flujo es una de las características más importantes en la ecología de los ríos, debido a que define la magnitud, frecuencia, duración, momento y tasas de cambio de los caudales, procesos que determinarán la distribución y abundancia de las especies en los ríos; en consecuencia, el régimen natural de flujo puede ser considerado una variable maestra para la ecología de los ríos (Poff et al., 1997). Sin embargo, en la mayoría de los ríos del mundo actualmente existe alguna alteración al régimen natural (Puig et al., 2016; Vörösmarty et al., 2010), ya sea de manera directa por la construcción de infraestructura hidráulica o bien por la agricultura, urbanización y otras alteraciones indirectas sobre las cuencas y sus regímenes de caudal.

En respuesta a las alteraciones en el régimen natural surgió el concepto de caudal ambiental, como una medida que reproduce el régimen natural en los ríos cuando existen obras que regulan el flujo. Una definición de los caudales ambientales se encuentra en la Declaración de Brisbane de 2007, la cual los define como “la cantidad, momento y calidad de los caudales de agua necesarios para mantener ecosistemas de agua dulce y de estuario, así como el sustento y bienestar humano que dependen de estos ecosistemas” (Arthington et al., 2018). Es así como la necesidad de mantener o restaurar las características de flujo en los ríos ha provocado que los caudales ambientales se utilicen como una respuesta a los daños ecológicos, generados por las alteraciones al régimen natural de caudal (Papadaki et al., 2017)

Por otra parte, existen muchas actividades humanas que pueden alterar el régimen natural de flujo, desde el cambio de uso de suelo en las cuencas, la extracción de agua para consumo humano o bien infraestructura hidráulica sobre los cauces. Dentro de la

infraestructura hidráulica que se construye en los ríos sobresalen las centrales hidroeléctricas, al ser la principal fuente de energía renovable en el mundo (International Energy Agency, 2020). La generación hidroeléctrica se basa en un proceso relativamente sencillo que utiliza la energía cinética de la caída del agua para transformarla en energía eléctrica. Este proceso tiene muchas variantes, las cuales se diferencian en los tipos de diseño, obras, maquinaria y características de la energía generada; además estas diferencias también inciden en los impactos ambientales y sociales, que pueden ser de diferente naturaleza y magnitud (Egré y Milewski, 2002a). Generalmente la clasificación de las presas se hace en función a su altura, volumen de almacenamiento, generación y tipo de diseño. De estas formas de clasificación, las más utilizadas son la capacidad de almacenamiento y altura de la cortina, siendo las grandes centrales las que más impactos generan, debido a que la altura y el volumen son características que determinarán la extensión de los impactos ambientales y sociales generados (Egré y Milewski, 2002a; Tkáč, 2018). En consecuencia, recientemente se ha optado por pequeñas centrales, incluyendo minihidroeléctricas en lugar de las grandes centrales, debido a que tienen bajos costos socioeconómicos y ambientales, producen emisiones menores de gases de efecto invernadero, tienen menor impacto en los servicios ecosistémicos y suelen tener costos menores respecto a las grandes centrales (Couto y Olden, 2018). Sin embargo, las minicentrales no están libres de impactos ambientales, afectado en la mayoría de los casos el régimen natural de los ríos, sobre todo si el diseño requiere embalses (Steinmetz y Sundqvist, 2014).

Una estrategia que puede aportar a la conservación de los ecosistemas pluviales es establecer el caudal ambiental durante las etapas tempranas de la planeación de las

minihidroeléctricas, ya que conocer de manera precisa la disponibilidad de agua ayudará a definir el potencial para generar energía. Esto a su vez permitirá identificar zonas dentro de las cuencas donde sea posible asignar parte del caudal a la generación eléctrica, evitando lugares con estrés hídrico y favoreciendo sitios que permitan reproducir el régimen natural en presencia de las centrales minihidroeléctricas. Además, conocer el caudal ambiental permitiría identificar tempranamente algunos impactos ambientales y sociales, ligados al régimen de los ríos y de esta forma evitarlos, mitigarlos o compensarlos oportunamente. Es de resaltarse que estas consideraciones se establecen entre las buenas prácticas propuestas por la *International Hydropower Association*, dentro de las etapas de implementación, preparación y operación; como parte del protocolo para la evaluación de la sustentabilidad hidroeléctrica (*International Hydropower Association*, 2019).

Como primer paso en la planeación proyectos minihidroeléctricos, es necesario conocer de manera precisa la disponibilidad de agua y las variaciones de altura en el cauce, con el fin de determinar si los sitios son aptos para realizar la instalación de este tipo (Adhikary y Kundu, 2014). Una vez determinados los valores de caudal, sus cambios durante el año y las variaciones de altura a lo largo de cauce, es posible determinar la cantidad de energía que podría ser generada bajo diferentes esquemas de obra (Punys et al., 2011). Es en este punto donde se pueden integrar las evaluaciones de caudal ambiental, para ser contempladas en los esquemas de generación y así mejorar los planes de diseño y operación de las centrales.

En conclusión, debido al reconocimiento de los fuertes impactos que provocan las grandes presas (Couto y Olden, 2018; Puig *et al.*, 2016; Steinmetz y Sundqvist, 2014), la

oposición social a su construcción (*World Commission on Dams*, 2000) y la necesidad de mantener la mayor conectividad fluvial en cuencas con baja alteración por infraestructura (Pringle, 2003); resulta indispensable integrar los caudales ambientales como un criterio de evaluación del potencial minihidroeléctrico, lo que permitirá tomar mejores decisiones durante la selección de los esquemas de obras, conservando el flujo necesario para mantener la integridad de los ecosistemas fluviales mientras se genera electricidad.

4 Objetivo General

Reconocer el régimen natural de las subcuencas del río Verde con potencial minihidroeléctrico y analizar cómo el caudal ambiental mínimo influye en el potencial minihidroeléctrico en los sitios seleccionados.

4.1 Objetivos Particulares

- Definir las características hidrológicas y geográficas para determinar sitios con potencial minihidroeléctrico.
- Determinar el régimen natural en los sitios con potencial minihidroeléctrico.
- Calcular el potencial minihidroeléctrico de los sitios seleccionados.
- Estimar los umbrales de los caudales mínimos ecológicos como criterio de evaluación del potencial.
- Calcular el potencial minihidroeléctrico conservando el caudal correspondiente a los componentes mínimos de los caudales ambientales.
- Determinar los diferentes esquemas y equipos de las minicentrales más adecuados a partir de la potencia calculada manteniendo los componentes mínimos de los caudales ambientales.

5 Marco Teórico

5.1 Régimen de flujo

Históricamente el manejo de los recursos hídricos se realizaba desde la perspectiva del suministro humano, procurando maximizar el abastecimiento para el uso doméstico, la agricultura y la industria (Dyson et al., 2003; Rudra, 2018). Sin embargo, en las últimas décadas los ríos se han comenzado a reconocer como ecosistemas complejos, con valor biológico intrínseco y que aportan una amplia variedad de servicios ambientales (Poff et al., 1997).

Una característica importante de las cuencas y sus redes hídricas es el orden que estas redes alcanzan. Desde la cabecera hasta la desembocadura de una cuenca, las variables físicas de un sistema de arroyos presentan un gradiente continuo en cuanto al ancho, velocidad, profundidad, caudal, sinuosidad del cauce, depósito de sedimentos, etc. (Vannote et al., 1980). El orden de los ríos es una medida que da indicios respecto al área de contribución, las dimensiones de los canales y la descarga de la corriente y toma valores positivos enteros en función de la estructura de la red de drenaje. Establecer el orden de las corrientes sirve como un primer acercamiento para su clasificación y su estratificación (Gordon et al., 2004). Aunque es importante destacar que un río con orden alto no forzosamente representa un río muy grande.

De acuerdo con Poff *et al* (1997), los cinco componentes del régimen de flujo son la magnitud, frecuencia, duración, temporalidad y tasa de cambio de los caudales. Estos componentes tienen influencia directa sobre la integridad ecológica e indirecta a través de sus efectos en otros reguladores ecológicos primarios, en consecuencia, las

modificaciones del flujo generan un efecto de cascada en la integridad ecológica de los ríos.

El régimen natural de flujo puede variar en diferentes escalas de tiempo: horas, días, estaciones, años e incluso periodos mayores, por lo que resulta indispensable contar con observaciones de largos periodos de tiempo que permitan describir y analizar los patrones temporales, la cantidad de flujo y la variabilidad. Además, los patrones de flujo están asociados mayormente al tamaño del río, el orden que alcanza y a las variaciones geográficas del clima, la geología, la topografía y la cobertura vegetal. En consecuencia, la estructura física de los ríos y los hábitats que generan se definen por los procesos físicos, especialmente los movimientos y depósitos del agua y sedimentos dentro del canal y en las planicies de inundación. Así, los procesos ecológicos que influyen en la biodiversidad, la productividad y la sustentabilidad de los ecosistemas fluviales están definidos mayormente por el ambiente físico y sus variaciones (Arthington et al., 2004a; N. L. R. Poff, 2018; N. L. R. Poff et al., 1997).

Esta diversidad de hábitats en los cauces, canales y planicies de inundación ha promovido la evolución de especies que explotan un mosaico de hábitats, creado y mantenido por la variación hidrológica. Para completar su ciclo de vida, muchas especies de los ríos requieren de diferentes tipos de hábitats, cuya disponibilidad temporal se encuentra determinada por el régimen natural de flujo. Este patrón de hábitats crea diferencias tanto sutiles como profundas en la historia natural de las especies y tiene una gran influencia en su distribución y abundancia, así como en las funciones ecosistémicas que cumplen. En periodos de años o décadas, un río puede proveer de forma consistentes hábitats efímeros, de temporada y permanentes; los cuales pueden variar desde el flujo

libre y constante, zonas sin movimiento y hasta áreas sin agua (Bunn & Arthington, 2002; N. L. R. Poff et al., 1997; N. L. Poff & Zimmerman, 2010).

Algunas características del régimen natural de flujo se pueden establecer partir de parámetros hidrológicos, que pueden ser más de 34 (The Nature Conservancy, 2011). Entre éstos se pueden incluir los días con caudal cero, la curva de duración de caudales, los caudales mínimos para un día, los caudales extremadamente bajos, la duración de los caudales extremadamente bajos, la frecuencia de los caudales extremadamente bajos y los componentes de caudal ecológico, que están asociados a la generación de menor escala, por ejemplo.

5.1.1 Días de caudal cero

Los días de caudal cero son la cantidad de días que el cauce permanece sin caudal. Este efecto se da sobre todo en corrientes estacionales, pero en casos de sequías de larga duración, algunos ríos normalmente considerados perenes pueden tener días sin caudal. La ausencia de caudal favorece el establecimiento de plantas colonizadoras, cambia la morfología de los ríos y sobre todo afecta las condiciones físicas del hábitat. Genera estrés de algunos organismos, puede impactar en la distribución espaciotemporal de varias poblaciones e incluso aumentar la depredación de algunas especies (The Nature Conservancy, 2011). En términos de generación los días con caudales cero establecen periodos donde resulta imposible generar electricidad.

5.1.2 Curva de duración de caudales

Las curvas de duración de caudales son curvas de acumulación de frecuencia que muestra el porcentaje de tiempo en el cual un valor de caudal es igualado o excedido para un periodo de análisis, puede ser calculado para cada mes o de manera anual. Esta curva

logra combinar las características de flujo a través de los diferentes rangos de descarga, sin considerar la secuencia en la que ocurren, aunque los flujos se asocian a temporadas de lluvias y estiaje (Searcy, 1959). Las curvas de duración de caudales permiten establecer el porcentaje de la disponibilidad de caudales para un periodo mensual o anual, lo que permite tener una referencia de la cantidad de agua para caudales ambientales u otros usos como generación eléctrica o consumo humano (Dametew, 2016).

5.1.3 Mínimos para un día

Los caudales mínimos para un día son un indicador de las condiciones extremas, pero de muy corta duración. Este indicador muestra el promedio del día con caudal mínimo para cada año analizado, los caudales mínimos para un día permiten establecer condiciones de estrés para las comunidades de plantas y animales asociadas a los ríos, como son el estrés de las condiciones de humedad, disolución de oxígeno y concentración de ciertos compuestos químicos (The Nature Conservancy, 2011).

5.1.4 Caudales extremadamente bajos

Estos caudales representan las condiciones más extremas presentes durante los periodos de sequía. Estos caudales ejercen presión sobre muchos organismos, provocando cambios en la química de agua, la temperatura y la disponibilidad de oxígeno disuelto. Estas condiciones extremas perjudican la mayoría de las especies presentes en los ríos, incluyendo especies invasoras. Sin embargo, también pueden generar condiciones favorables para poblaciones de depredadores, debido a que pueden favorecer la concentración de individuos en las zonas bajas y encharcadas, haciéndolas presas más fáciles. También pueden secar áreas bajas de las planicies de inundación y

de esta manera favorecer que algunas poblaciones de plantas se regeneren, permitiendo el reclutamiento de plantas jóvenes (The Nature Conservancy, 2011).

5.1.5 Duración de los caudales extremadamente bajos

La duración de los caudales extremadamente bajos expresa de manera anual el número de días con caudales bajos extremos. Este parámetro es una medida de la duración de las condiciones de estrés hídrico, la cual determina las condiciones de estrés prolongadas por bajos volúmenes de caudal, estas condiciones inciden en la estructura de los ecosistemas acuáticos por factores abióticos y bióticos, la deshidratación en los animales y el estrés anaeróbico en las plantas (The Nature Conservancy, 2011). Desde el punto de vista del diseño de proyecto minihidroeléctricos permite establecer los periodos en los que probablemente sea necesario limitar la generación o pararla por completo.

5.1.6 Frecuencia de los caudales extremadamente bajos

La frecuencia de los caudales extremadamente bajos establece la cantidad de veces en un año en la que ocurren. Este parámetro indica cuántas veces al año o en qué período de 30 o 90 días se presentaron las condiciones extremas de bajo caudal (The Nature Conservancy, 2011).

5.1.7 Caudales diarios promedio

Los caudales diarios promedio se calculan a partir de los datos históricos de cada una de las estaciones, siempre que no presentaran caudales cero durante periodos prolongados. Este análisis establece el comportamiento de régimen natural para cada día del año calendario y se realiza promediando todos los valores de caudal registrados para cada uno de los días del año, incluyendo los años bisiestos, por lo que el resultado tendrá 366 valores promedio. Este valor permite conocer la disponibilidad total de agua en un

cauce, detectando la disponibilidad diaria del caudal durante las temporadas de lluvia y estiaje, así como los periodos cíclicos con mayor y menor caudal. Este dato posee una alta importancia desde la perspectiva de la generación eléctrica ya que permite conocer la disponibilidad total de flujo para el cálculo del potencial hidroeléctrico.

Los cálculos fueron obtenidos a partir de la pestaña de resultados de efectos diarios del programa IHA 7.1 y, con el fin de mejorar la comprensión de los caudales más bajos se utiliza una escala logarítmica.

5.1.8 Caudales bajos mensuales

Los caudales bajos mensuales (CBM) generan en los ecosistemas hábitats adecuados, manteniendo la temperatura, el oxígeno disuelto y la química del agua. También mantiene los niveles freáticos adecuados en las planicies de inundación, así como la humedad del suelo en las zonas de influencia de los ríos y proporciona agua potable para los animales terrestres. Por ejemplo, mantiene los huevos de los peces y anfibios en suspensión, permitiendo también que los peces puedan desplazarse a diferentes áreas de alimentación y desove. Estos niveles de caudal también ayudan a mantener las poblaciones de organismos hiporreicos (The Nature Conservancy, 2011). En este estudio, se presta especial atención a los caudales bajos, debido a que estos pueden ser un factor limitante para la generación eléctrica. Para determinar las necesidades de caudal ecológico se utilizaron los valores de caudales bajos mensuales (CBM), que son los valores de la mediana de los caudales bajos para cada mes. Los CBM generan en los ecosistemas hábitats adecuados, manteniendo la temperatura, el oxígeno disuelto y la química del agua, además de los niveles freáticos y de humedad en las planicies de inundación, la humedad del suelo en las zonas de influencia de los ríos y proporciona agua

potable para los animales generando importantes aportes para los ecosistemas terrestres asociados.

5.2 Centrales hidroeléctricas

Una central hidroeléctrica puede definirse como una instalación que convierte la energía cinética disponible por la caída de agua en energía mecánica, a través de la rotación de una turbina; esta turbina mueve un generador, el cual finalmente produce la energía eléctrica. La cantidad de energía producida será proporcional al flujo y la carga hidráulica (Al Khudhiri et al., 2018; European Small Hydropower Association - ESHA, 2004).

Por otra parte, en el último siglo el crecimiento poblacional, el incremento de la urbanización y la rápida expansión de las actividades industriales, han aumentado las necesidades de consumo eléctrico, especialmente en países en vías de desarrollo (Tkáč, 2018). De toda la energía generada en el mundo, alrededor del 16% procede de centrales hidroeléctricas (International Energy Agency, 2020), lo que equivale al 75% de la energía renovable producida a nivel mundial.

Existen muchas formas de clasificar a las centrales hidroeléctricas: por la cantidad de energía que generan, por la manera en que manejan el agua para la generación o por la forma en que adquieren carga hidráulica (Al Khudhiri *et al.*, 2018; *European Small Hydropower Association* - ESHA, 2004; Japan International Cooperation Agency, 2011). Según la *International Commission on Large Dams*, las centrales minihidroeléctricas son aquellas con tamaños menores a 15 m de altura o con almacenamientos menores a los 3 millones de m³, mientras que las grandes centrales son aquellas mayores de 15 m o bien con una altura de entre 5 y 15 m y con un embalse mayor a los 3 millones de m³ (ICOLD,

2011). Algunas clasificaciones internacionales basadas en la capacidad instalada indican que entre 1 y 25 MW la central puede considerarse como pequeña, mientras que las centrales con capacidad de entre 100 kW a 1 MW se consideran minihidroeléctricas (Chen *et al.*, 2020; Tkáč, 2018). En México la clasificación realizada en el Inventario Nacional de Energías Renovables de 2017 solo distingue entre pequeñas y grandes centrales, las primeras cuando su generación es menor a 30 MW y grandes cuando su generación es mayor (Palacios-Fonseca *et al.*, 2017). En cuanto a su diseño Couto y Olden (2018), clasifican a las centrales minihidroeléctricas como instalaciones con menor capacidad de generación y que operan en ríos menores, en comparación con las grandes centrales. Estos autores toman en consideración si las centrales tienen almacenamiento, derivación o si combinan estas dos características También calculan la existencia de 82,891 plantas, operando y algunas en proceso de construcción, consideradas pequeñas hidroeléctricas (Chen *et al.*, 2020; Couto y Olden, 2018).

Otro aspecto de las centrales hidroeléctricas es que suelen generar una amplia gama de impactos ambientales, principalmente sobre la biodiversidad, el transporte de sedimentos, la migración de especies en los ríos, la producción de gases de efecto invernadero y el régimen hidrológico (Steinmetz y Sundqvist, 2014). Siendo este último una parte fundamental de las dinámicas fluviales, ya que es considerado un factor clave en la ecología de los ríos y sus sistemas asociados. La protección y restauración del régimen natural, a través de la determinación de los caudales ambientales se ha convertido en un aspecto crucial en el manejo de las cuencas y sus ríos (Arthington *et al.*, 2004; Chen *et al.*, 2020; Dyson *et al.*, 2003; Puig *et al.*, 2016; Tennant, 1976).

5.2.1 Centrales minihidroeléctricas

En la última década las centrales minihidroeléctricas, con generaciones entre 100 kW y 1 MW, han surgido como una opción sustentable y de bajo costo, especialmente en el marco del calentamiento global por la emisión de gases de efecto invernadero (Kumar, 2007; Rojanamon et al., 2009). Aunque no es el tamaño de las centrales la que define si un proyecto es sustentable, sino las características particulares de los sitios y de los proyectos (Egré y Milewski, 2002a), en términos generales, las minihidroeléctricas requieren un menor caudal y menor altura del embalse en comparación con las hidroeléctricas convencionales o de mayor tamaño. Además de que en ocasiones no requieren embalses, que es uno de los elementos de las hidroeléctricas que mayores impactos produce, la mayoría de las minihidroeléctricas son plantas al hilo del agua o con derivaciones (Adhikary y Kundu, 2014).

Los proyectos al hilo del agua o hidrocinéticos se caracterizan por no requerir energía potencial almacenada en un embalse, sino que utilizan la energía cinética propia de los ríos, es decir, utilizan el flujo dentro de los rangos naturales del río y pueden utilizar todo el caudal o solo una fracción de este, lo cual da oportunidad a reducir los impactos por fragmentación de hábitat para las especies que habitan estos ríos (Egré y Milewski, 2002a; Steinmetz y Sundqvist, 2014). Estos esquemas no generan grandes embalses, aunque en ocasiones se construyen pequeños diques o tomas. Esta cualidad hace que la generación de estas minicentrales pueda variar de manera considerable en función de los caudales disponibles. Sin embargo, ampliar la capacidad de la planta no resulta benéfico, al menos que los periodos de mayor demanda en la generación coincidan con los pulsos altos de caudal, lo cual resulta improbable. Por esta razón, la mayoría de las plantas

minihidroeléctricas al hilo del agua son diseñadas para generar la misma cantidad de energía a lo largo del año, en otras palabras, este tipo de centrales pueden limitar su generación en función del caudal que se encuentre disponible en el río. Debido a esto resulta indispensable conocer de manera precisa las características hidrológicas de los sitios con potencial minihidroeléctrico, así como las necesidades de caudal ambiental que ahí imperan (Adhikary y Kundu, 2014; Egré y Milewski, 2002b; Kumar, 2007; Punys et al., 2011; Rojanamon et al., 2009)

Una de las principales limitantes durante la identificación de sitios y la planeación de los proyectos minihidroeléctricos es la falta de información hidrológica (Kaunda et al., 2012; Kumar, 2007; Punys et al., 2011; Rojanamon et al., 2009). Es frecuente que los datos de caudal sean muy antiguos, de periodos cortos, de áreas lejanas a los sitios de interés o simplemente no existan mediciones hidrológicas de las cuencas o cauces de interés. Esta falta de datos genera una mayor incertidumbre cuando se pretende calcular la disponibilidad de agua para los caudales ambientales y la generación en los diferentes sitios.

Una manera de reducir costos y tiempo para la identificación de sitios con potencial minihidroeléctrico es el uso de herramientas de software, como los Sistemas de Información Geográfica (SIG), estas herramientas se han utilizado para realizar análisis a nivel de prefactibilidad en varios países del mundo. En términos generales, el uso de estos softwares ayuda a estimar la cantidad de energía que puede ser producida a partir de valores de la precipitación, los cambios topográficos en la pendiente de los ríos y los datos de caudales que, en combinación, permiten establecer la carga hidráulica aprovechable en un sitio del río, así como sus variaciones temporales (Punys et al., 2011; Rojanamon

et al., 2009). Por otra parte, la combinación de estas tecnologías informáticas y la evolución de los sensores de percepción remota, especialmente la tecnología LIDAR (*Light Detection and Ranging*), ha permitido un aumento importante de la disponibilidad de las características topográficas de las cuencas. Esta tecnología permite la creación de Modelos Digitales de Elevación (MDE) de grandes áreas en periodos cortos de tiempo y con una muy alta precisión (Punys et al., 2011), lo que permite analizar la topografía de las cuencas de manera rápida y precisa.

La construcción de centrales de pequeña escala también se ha visto favorecido debido a una serie de ventajas que estas plantas poseen sobre las de mayor tamaño (Adhikary y Kundu, 2014; Egré y Milewski, 2002a; Punys et al., 2011). Algunas de estas ventajas son la menor cantidad y magnitud de los impactos ambientales, menor generación de Gases de Efecto Invernadero (GEI), menores inversiones desde las etapas de planeación hasta el mantenimiento y menos oposición social a los proyectos (Couto y Olden, 2018; Kaunda et al., 2012; Rojanamon et al., 2009; Steinmetz y Sundqvist, 2014). También pueden ser instaladas en regiones rurales apartadas, donde la construcción de líneas de distribución es demasiado costosa, en proporción a la población beneficiada. Estas zonas rurales alejadas suelen coincidir con regiones montañosas con ríos perenes, lo que hace que estas centrales sean ideales para establecer redes eléctricas locales y aumentar la energía disponible en sitios remotos (Kaunda et al., 2012).

Rojanamon *et al*, (2009), aplicaron un método de identificación de sitios con potencial de generación con centrales al hilo de agua, a partir de criterios económicos, ambientales, de ingeniería y sociales en la cuenca alta del río Nan en el norte de Tailandia. El área de estudio se encuentra aguas arriba del embalse de la presa Sirikit, una de las

presas de mayor tamaño de ese país. Utilizando los SIG se delimitaron los criterios para identificar sitios potenciales, se delimitaron las cuencas y se realizaron cálculos sobre escurrimientos y caudales, se identificaron sitios para la construcción de la casa de máquinas y, finalmente, se determinó la posición de las principales obras civiles como el tanque de compensación, la toma de agua y la ruta de la tubería a presión. Los análisis económicos se dividieron en costos directos e indirectos y se calculó la energía que se podría generar. El análisis ambiental se realizó utilizando seis parámetros, los cuales fueron estandarizados para lograr que fuera posible compararlos entre alternativas y sitios; los parámetros utilizados son las áreas de la cuenca, si existen parques o reservas de vida silvestre, el uso de suelo, la densidad de población, la producción media anual de sedimentos y sitios que son patrimonios culturales; estos análisis ambientales se realizaron utilizando una regresión lineal ponderada de todos estos parámetros, lo cual arrojó un clasificación de los sitios, del más al menos apto. Los impactos sociales se analizaron a partir de procesos de participación pública, encuestas de opinión y grupos focales de discusión. Esta metodología permitió identificar los sitios con las mejores características y que puede ser adaptada a diferentes regiones de estudio, ya que permite examinar grandes áreas y enfocarse en sitios con mayores posibilidades de desarrollo de centrales hidroeléctricas al hilo del agua.

5.3 Caudales ambientales y caudales ecológicos

Los conceptos de caudal ambiental y caudal ecológico son cercanos y en ocasiones son utilizados como sinónimos, sin embargo, algunos autores usan al caudal ambiental como un concepto un poco más amplio (Rudra, 2018). Por una parte, el caudal ecológico

es un término que refiere a la cantidad y calidad del agua que fluye en un río, sus patrones de distribución temporal y también su valor cultural y estético. Es un concepto utilizado frecuentemente para asignar un caudal mínimo a ecosistemas ya impactados por obras hidráulicas. El caudal ecológico puede verse como un régimen de flujo (mensual) que puede proteger la integridad ecológica de un sistema fluvial, regresando al sistema a una posible estado natural o más parecido a este después de una perturbación por obras hidráulicas. Por otra parte, el termino caudal ambiental está influenciado por la visión de manejo de los recursos naturales, considerando la reproducción total o parcial del régimen hidrológico en períodos hasta de 10 años continuos o de manera alternada, para incluir las necesidades ecológicas, de riego, de generación hidroeléctrica y de suministro de agua a ciudades e industria, etc., negociando e instrumentando su implementación. También es utilizado en un sentido más amplio, para incluir los usos consuntivo y no consuntivo dentro de los objetivos ambientales (Rudra, 2018).

Otras definiciones que operan desde un enfoque más ecológico señalan que “El caudal ecológico es la cantidad de agua necesaria en un determinado cuerpo de agua para garantizar su funcionalidad ecosistémica” (Arias y Terneus, 2012), mientras que el caudal ambiental “Es aquel régimen hídrico que se establece en un cuerpo de agua, como una alternativa que busca encontrar un equilibrio entre las necesidades del ambiente y las humanas, preservando los valores ecológicos, el hábitat natural (flora y fauna) y todas las funciones ambientales, cuya presencia contribuye a la sostenibilidad socioeconómica de los usuarios del recurso” (Poff, 2018).

La diferencia conceptual entre el caudal ecológico y ambiental radica en que este último, además de referirse a la ecología de los ríos, contempla los beneficios que los ríos

brindan a los seres humanos, como abastecimiento a poblaciones, industria, riego, servicios turísticos, culturales y de generación de energía. Es importante mencionar que el concepto de caudal ambiental supone que es posible alcanzar las metas de conservación y uso del agua con caudales menores al natural, asumiendo que la diferencia entre caudal ambiental y el ecológico asignado no tendrá consecuencias notables en el ecosistema (Aguilera y Pouilly, 2012)

En México, la norma mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012 emplea caudal ambiental y caudal ecológico como sinónimos y lo define como “La cantidad, calidad y variación del gasto o de los niveles de agua reservada para preservar servicios ambientales, componentes, funciones, procesos y la resiliencia de ecosistemas acuáticos y terrestres que dependen de procesos hidrológicos, geomorfológicos, ecológicos y sociales” (Diario Oficial de la Federación México, 2012). A partir de esta definición surge la necesidad de reservar una cantidad de agua en los ríos no alterados por infraestructura, para cumplir las necesidades de los ecosistemas, de modo que la disponibilidad de agua para otros usos se verá limitada (Kuriqi *et al.*, 2017).

5.4 Estudios de prefactibilidad

Para la construcción de las centrales hidroeléctricas, incluidas las minicentrales, es necesario considerar varias etapas de planeación que determinaran la posibilidad de su construcción en un sitio determinado, así como las características generales de la central, sus impactos y costos entre otras características.

Los estudios de gran visión y de prefactibilidad son los que inician el desarrollo de un proyecto, en estos se determina los lugares con las condiciones generales para desarrollar un proyecto hidroeléctrico, para continuar con los estudios necesarios para la construcción y operación de una central hidroeléctrica (Rivas Carpio, 2013). En la fase de prefactibilidad se elige el esquema de la planta y sus características técnicas generales, se determinan las características ambientales de la zona, así como los posibles impactos, se observan las características sociales y la viabilidad legal y financiera. Por lo tanto, en esta etapa es necesario que el desarrollo conceptual de la central sea lo suficientemente detallado para determinar su influencia en el ambiente y la sociedad, así como en sus costos y la identificación de posibles problemas críticos (Ball et al., 2020).

Los cinco pilares de los estudios de prefactibilidad según Ball *et al* (2020) son:

- Estudios Hidrología. Permite definir los caudales mínimos durante el estiaje, las crecidas máximas, sus periodos de retorno y el caudal ecológico, entre otras características.
- Estudios Topográficos. Permite establecer parte de los costos y características importantes como la altura bruta y la longitud del cauce.
- Análisis ambiental. Caracterizar de manera general el ambiente permitirá determinar el caudal real aprovechable, así como los impactos a diferentes poblaciones de peces, además de las afectaciones por obras adyacentes permanentes o temporales sobre los ecosistemas relacionados a los proyectos.
- Identificación de beneficios sociales potenciales.



- Procedimientos de autorización. Se identifican los permisos y licencias necesarios y sus costos, así como los tiempos de implementación.

En México, la Comisión Federal de Electricidad ha elaborado tres ediciones del Manual de Diseño de Obras Civiles (1969, 1983, 2015), el cual fue escrito en colaboración con el Instituto de Ingeniería de la UNAM. Este manual se encuentra dividido en tres secciones: Hidrotecnia, Geotecnia y Estructuras. Cada sección se encuentra dividida en temas y capítulos, publicados de manera separada, en los que se detallan recomendaciones, comentarios y ayudas de diseño, así como los aspectos teóricos y algunos métodos de diseño (Mendoza et al., 2015). A continuación, se mencionan algunos de los capítulos en cada uno de los temas.

Sección A hidrotecnia:

- En el tema *Hidrología* se encuentran los capítulos de precipitación, escurrimiento, pérdidas, relación precipitación-escurrimiento, análisis estadísticos, tormentas de diseño, avenidas de diseño, tránsito de avenidas y simulación del funcionamiento de vasos de almacenamiento, pronóstico de avenidas, geohidrología, sistemas de información geográfica, hidrología e hidráulica en cuencas pequeñas.
- En el tema *Hidráulica* los subtemas abarcan planeación de sistemas de aprovechamiento hidroeléctrico, evaluación del impacto ambiental para la ejecución de proyectos hidroeléctricos, obra de toma para plantas hidroeléctricas, máquinas hidráulicas, turbinas y análisis dinámico, escurrimiento a superficie libre, tránsito hidrológico e hidráulico y en cauces,

obra de desvío, obra de excedencias, hidráulica fluvial, sedimentación en embalses y desarenadores, evaluación de la seguridad hidráulica de las estructuras y rehabilitación hidráulica de las estructuras entre otros capítulos.

Sección B Geotecnia:

- El tema *Geología* se divide en información geológica existente, obtención y análisis de información geológica, presentación de información geológica y estudios de peligro sísmico.
- En *Mecánica de Suelos* se encuentra la clasificación y caracterización de los depósitos de suelos, pruebas de laboratorio para determinar las propiedades de los suelos y enrocamientos, pruebas de campo para determinar propiedades de los suelos y enrocamientos, comportamiento de suelos parcialmente saturados y aplicaciones, cimentaciones en suelos, estructuras de retención, estabilidad de taludes, excavaciones y laderas, mejoramiento de suelos y flujo de agua en suelo.
- En *Mecánica de Rocas* se encuentran los capítulos de pruebas de campo, caracterización de macizos rocosos, cimentaciones en rocas, estabilidad y tratamientos de taludes rocosos, métodos de excavación y caracterización de geomateriales frontera entre otros.
- En *Diseños de Presas* se encuentran las secciones enrocamientos con núcleo de arcilla, enrocamiento con cara de concreto, enrocamiento con núcleo de asfalto, de jales, suelo-cemento con cara de concreto.
- Otros temas de la sección Geotecnia se encuentran los temas de *túneles y lumbreras, control de calidad, instrumentación y aplicaciones generales*.

Sección C Estructuras

- En *Criterios Generales de Análisis y Diseño* se encuentran los temas métodos de diseño, acciones, diseño por sismo, diseño por viento, análisis de estructuras.
- En *Diseño de Estructuras Especiales* se encuentran los temas diseño estructural de cimentaciones, estructurales en obras hidráulicas, compuertas, y casa de máquinas, entre otras.
- Otros temas dentro de esta sección son: *Monitoreo y control de respuestas estructurales, Evaluación de la seguridad y rehabilitación de estructuras, Materiales de construcción y Diseño de presas de concreto o mampostería.*

5.5 Potencial minihidroeléctrico

En los ríos el caudal que fluye por un cauce realiza un trabajo ya que posee energía potencial y cinética. Este trabajo se determina con base en la inclinación del cauce del río y el caudal, entre mayores sean estas variables la energía hidráulica también será mayor. Esta energía, denominada recurso hidroenergético o potencial hidroenergético, es la base de la generación eléctrica, por lo que su determinación es uno de los aspectos más importantes de la planeación de una central minihidroeléctrica (Sandoval Erazo, 2018).

La disponibilidad del agua y las condiciones del terreno determinaran si un proyecto resulta factible, así como el esquema de obra más adecuado para las condiciones presentes y las necesidades de generación (Belmonte *et al.*, 2008). De esta manera, la

determinación de potencial energético es uno de los componentes clave para este proceso de evaluación.

El potencial hidroeléctrico es el primer acercamiento al cálculo de la electricidad que puede ser generada en un río y se define como la potencia total entregada por el caudal al discurrir por un cauce, desde una cota superior a una inferior y bajo la suposición de que no hay pérdidas de ninguna naturaleza, como pueden ser las hidráulicas, mecánicas o eléctricas. Además de las reducciones al caudal establecidas por los usos ambientales y humanos del agua (Avelino Pérez, 2016; Belmonte *et al.*, 2008).

La manera en que se calcula la potencia hidroeléctrica es utilizando la siguiente ecuación:

$$P = \gamma * Q * H * ns * 9.81$$

Donde P es el potencial hidroeléctrico en kilovatios (kW), Q es el caudal medio (m^3/s), γ es el peso específico del agua ($\approx 1,000 \text{ kg/m}^3$), H carga hidráulica disponible (m), ns es la eficiencia total de la planta, generalmente entre 75 y 90 (%) y 9.81 es la aceleración de la gravedad (m/s^2) (Avelino Pérez, 2016; BHA, 2005; Meza-Prieto y Aparicio, 2018; Palacios-Fonseca *et al.*, 2017; Sandoval Erazo, 2018; Trelles Jasso *et al.*, 2007).

Es importante destacar que el gasto o caudal varía de manera natural en función del clima, la temporada del año, así como de manera interanual por periodos de sequía o inundaciones. Esta variación determina los caudales ambientales, los cuales repercuten en la calidad, cantidad y régimen de flujo, afectando los procesos ambientales (Diario Oficial de la Federación México, 2012).

5.6 Potencial hidroeléctrico y caudales mínimos ecológicos

Debido al reconocimiento de los impactos que pueden provocar las presas (Couto y Olden, 2018; Puig et al., 2016; Steinmetz y Sundqvist, 2014), la oposición social a su construcción (World Commission on Dams, 2000) y la necesidad de mantener conectividad fluvial en las cuencas con baja alteración (Pringle, 2003); resulta indispensable conocer las necesidades de caudal ecológico en los sitios con potencial minihidroeléctrico, con el fin de mantener las condiciones del régimen natural de los ríos donde se construirán los proyectos minihidroeléctricos (Steinmetz y Sundqvist, 2014).

Es por esta razón que la evaluación de los sitios para la planeación de proyectos minihidroeléctricos inicia determinando la disponibilidad de agua y las variaciones de altura (Adhikary y Kundu, 2014). Una vez determinados los valores de caudal, sus variaciones durante el año y las condiciones topográficas a lo largo de cauce, es posible determinar la cantidad de energía que podría ser generada bajo diferentes esquemas de obra (Galarza Hidalgo, 2015; Palacios-Fonseca et al., 2017; Punys et al., 2011; Schenzer et al., 2014). En este punto del análisis se pueden integrar las evaluaciones de caudal ambiental, para que sean contempladas en los esquemas de generación, mejorando los planes de diseño y operación de estas centrales.

5.7 Esquemas de obras

Desde el punto de vista del diseño y elección de los esquemas de obra en las minihidroeléctricas existen algunos factores que pueden representar dificultades técnicas,



además de las ambientales y sociales que tiene que ser solventadas (Dametew, 2016).

Entre estos factores se encuentran:

- La curva de duración de caudales: la elección del tipo de turbina, su tamaño y velocidad dependerán de su carga hidráulica neta y de la tasa de flujo. Esto es determinado a partir de las características de los ríos donde se pretende instalar la planta.
- Medición de la tasa de flujo: existen varios métodos para medir la descarga en un punto de una corriente. Este factor es determinante para la elección del esquema de obra que se realizará.
- Dique y canal abierto: Cuando las descargas son menores a $4 \text{ m}^3/\text{s}$, es posible que se necesite la construcción de un dique. Este consiste en una pequeña pared o presa a lo largo del cauce, que posee una abertura para realizar mediciones de cuánta agua puede ser canalizada.
- Diseño de la tubería: su diseño dependerá de las características de la toma, la cantidad de agua, las características de los suelos donde será instalada y los materiales de esta.
- Cuantificación de la carga hidráulica: se debe calcular a partir de la distancia de la superficie del agua en la toma hasta el canal de descarga de las turbinas.
- Potencia de las turbinas: todo el diseño dependerá la disponibilidad de agua, la carga hidráulica que se pueda generar y de cómo estos dos factores interactúen sobre la turbina.

- Velocidad de las turbinas: la velocidad debe regularse a través de la tasa de flujo de agua.
- Selección del tipo de turbina: estará en función de la velocidad y la carga hidráulica. Entre las más utilizadas se encuentra las turbinas Pelton, Francis, Kaplan y de flujo cruzado.
- La distancia del proyecto a un centro de población.
- La dificultad de ampliación de las redes eléctricas.
- El alto costo de la electrificación, especialmente en regiones alejadas y de escasos recursos.
- La necesidad de limitar el uso de combustibles fósiles.

Las condiciones ideales para la generación hidroeléctrica son aquellas donde se combinen grandes caudales y a la vez diferencias de altura importantes. Sin embargo, estas condiciones no se dan frecuentemente en la naturaleza, por lo que es necesario generarlas de manera artificial, buscando reducir las trayectorias de los flujos y concentrando las caídas en los tramos más cortos posibles. Para lograr este objetivo se diseñan centrales hidroeléctricas con diferentes esquemas de obras.

5.7.1 Sistemas de carga baja y alta

Uno de los parámetros más importantes en el diseño de las centrales hidroeléctricas es la carga hidráulica y el volumen de flujo de descarga. El concepto de carga hidráulica corresponde a la diferencia de presiones hidrostáticas, medidas tanto en la entrada como en la salida de la planta. Generalmente se identifica la carga hidráulica bruta, como la diferencia de los niveles de agua superior e inferior, omitiendo las pérdidas de energía.

Por otra parte, la carga hidráulica es uno de los factores utilizados para clasificar a las centrales hidroeléctricas. Ball, *et al.* (2020) consideran que tradicionalmente la clasificación de los sistemas con cargas hidráulicas mayores a 70 m son de alta carga y aquellos que se encuentran por debajo de los 30 m se consideran de baja carga. Otros autores consideran que sistemas de alta carga hidráulica se encuentran por arriba de los 50 m, los de carga media entre 10 y 50 m y los de baja carga por debajo de los 10 m (BHA, 2005). Una tercera clasificación coloca las centrales de muy alta carga hidráulica entre 300 a 2000 m, de alta carga hidráulica entre 150 a 300 m, de carga hidráulica media entre 30 a 150 m y de baja carga hidráulica por debajo de los 30 m (Avelino Pérez, 2016). En el caso de las centrales pequeñas se pueden utilizar los términos de muy baja carga a los menores de 5 m y ultra baja carga a los de menos de 2.5 (Ball et al., 2020). En contraste, Trelles Jasso *et al.* (2007) clasifica como centrales minihidroeléctricas a aquellas con cargas hidráulicas menores a 10 m y las subdivide entre minihidroeléctricas con baja carga hidráulica, con menos de 2.5 m y minihidroeléctricas con alta carga hidráulica a las que se encuentran entre 2.5 a 10 m.

5.7.2 Esquemas con embalse

La forma más conocida de generar carga y al mismo tiempo almacenar un cierto volumen de agua es construyendo una cortina, la cual es una barrera artificial construida perpendicularmente al cauce del río y que tiene la función de acumular agua a una altura mayor a la del río. Estas estructuras generan un embalse, el cual garantiza el funcionamiento de una central por un tiempo determinado. Este diseño generalmente coloca la casa de máquinas al pie de la presa y permite disminuir las pérdidas hidráulicas, aprovechando al máximo la carga hidráulica, este esquema se utiliza frecuentemente en

sitios con cauce de poca pendiente (Sandoval Erazo, 2018). Desde el punto de vista ambiental estos esquemas cambian por completo el régimen natural del río, impactando de forma negativa en la biodiversidad, afectando los procesos migratorios de la fauna, el transporte de sedimentos y nutrientes, y la generación de gases de efecto invernadero (Chen et al., 2020; Steinmetz y Sundqvist, 2014) (figura 1).

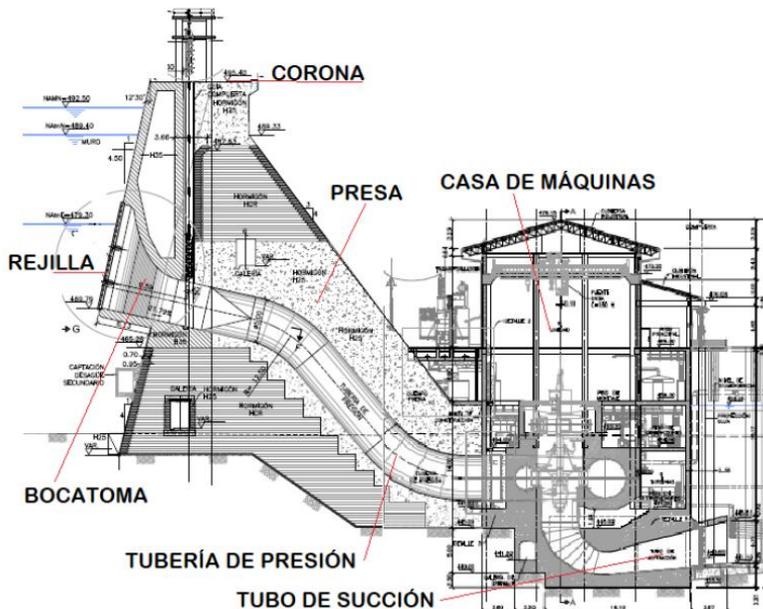


Figura 1. Casa de máquinas al pie de presa (Sandoval Erazo, 2018).

5.7.3 Esquemas con derivación

Por su parte, los diseños con derivación concentran la carga conduciendo el agua a través de un cauce artificial, con una pendiente menor a la del cauce natural, para posteriormente aumentar la carga en una distancia corta respecto a la casa de máquinas, a través de una tubería a presión. Estos esquemas generalmente se componen por varias estructuras, como son obras de toma al pie de la corriente natural, desarenadores, canal de conducción, embalse de regulación, tubería a presión, casa de máquinas y sistema de descarga. El esquema de desvío más frecuente comienza en una presa pequeña, que

divide el caudal entre el lecho natural del río y el conducto de desvío que generalmente no es presurizado y termina con un depósito de carga de donde se utiliza una conducción presurizada hasta la casa de máquinas (Sandoval Erazo, 2018) (Figura 2). Para garantizar el paso de caudal ambiental se diseñan dos tomas, una superior que conducirá a las turbinas y una inferior que permitirá el flujo calculado como caudal ambiental. De esta manera, una vez que el flujo supere el nivel de la tubería para caudal ambiental, ingresará a la tubería que transportará el excedente a las turbinas para generación (Figura 3).

Los esquemas con derivación ponen los sistemas de generación lejos del sitio de captación del agua, lo que permite el uso de toda la carga bruta disponible. Otra ventaja es que permite utilizar una presa/embalse pequeño o de baja altura y logran una carga bruta alta o muy alta. En el caso de algunas centrales pequeñas de alta carga es posible evitar la operación de cualquier vertedero, ya que la captación se puede ubicar directamente en el lecho del río. Así, el lecho antiguo se puede utilizar como una escalera de peces bidireccional natural, siempre que se cuente con el flujo residual necesario, es decir un caudal ambiental (Ball et al., 2020).

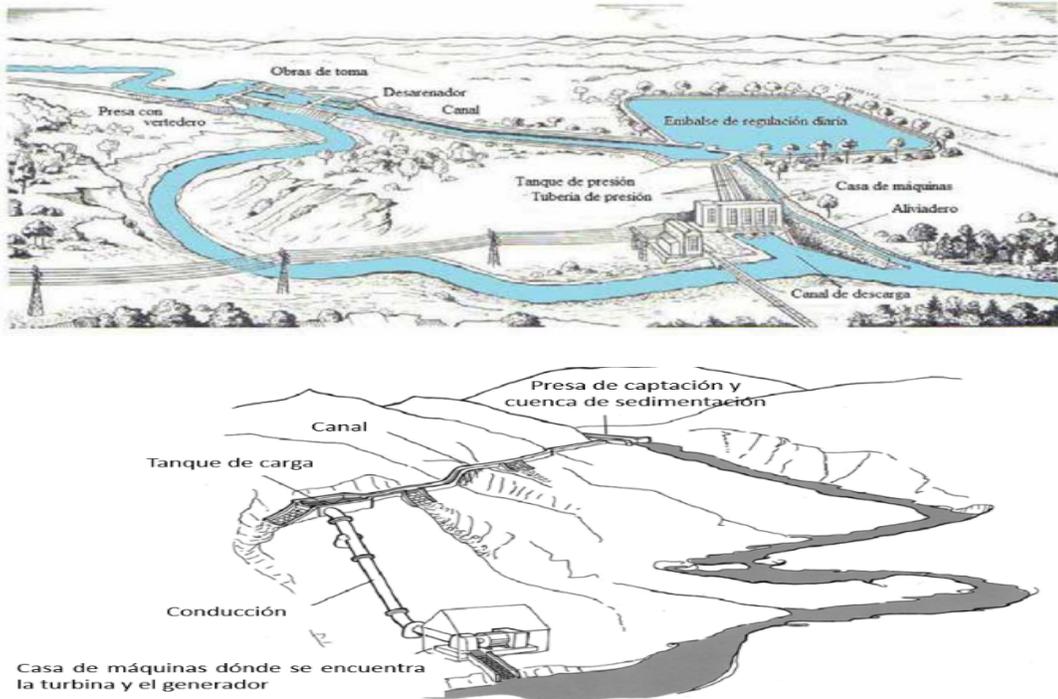


Figura 2. Esquemas de derivación mediante canal (Ball et al., 2020; Sandoval Erazo, 2018)

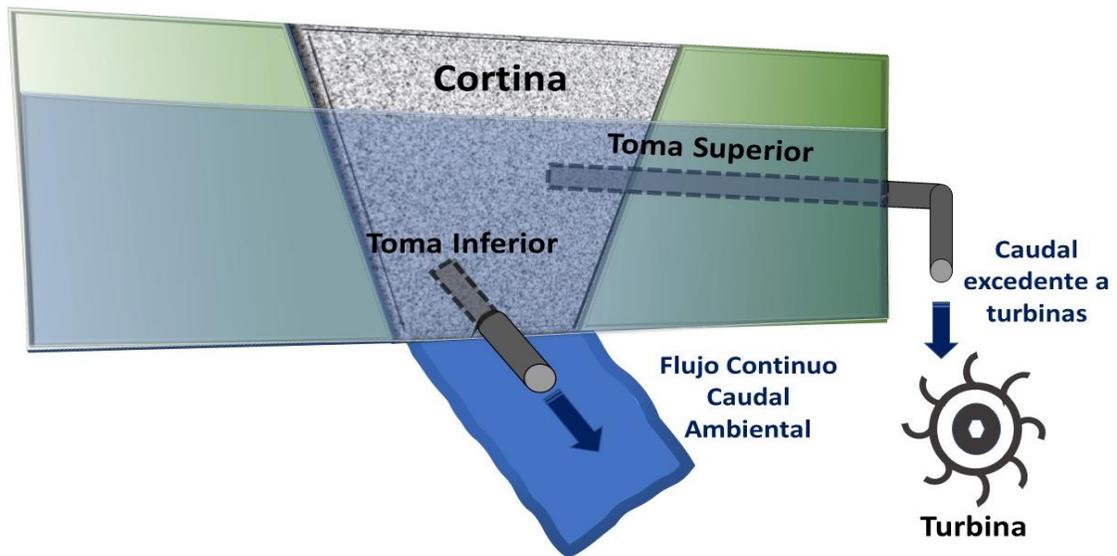


Figura 3. Diagrama de tomas para caudal ambiental y para generación.

5.7.4 Esquemas al hilo del agua o de paso

Los esquemas al hilo de agua, hidrocinéticos o también denominados de paso, utilizan la energía cinética del caudal libre del río, generalmente no poseen ningún dispositivo de almacenamiento y regulación del caudal, pueden tener una obra de derivación pequeña y es esta la que regula el flujo a la turbina. Se caracterizan por ser de baja carga y alto flujo. En los diseños que sí poseen almacenamiento este es pequeño y el tiempo de permanencia del agua es menor a dos horas. Es uno de los esquemas más utilizados en el sector de pequeñas hidroeléctricas y suelen utilizarse para apoyar a centrales de mayor potencia para cubrir la demanda pico (Figura 4). Frecuentemente estas centrales no operan en época de estiaje, por lo que con frecuencia no son económicamente viables por sí mismas (Avelino Pérez, 2016; Ball *et al.*, 2020). Una de las grandes ventajas de estos sistemas es que reducen los impactos ambientales sobre el caudal, el transporte de sedimentos y las migraciones dado que no coloca barreras y de hacerlo son pequeñas y sin almacenamientos (BHA, 2005). Algunos autores consideran a estas hidroeléctricas como el diseño esencial para el desarrollo de las energías renovables, ya que puede conservar la integridad ecológica de los ríos donde se construyen (Kuriqi *et al.*, 2017)

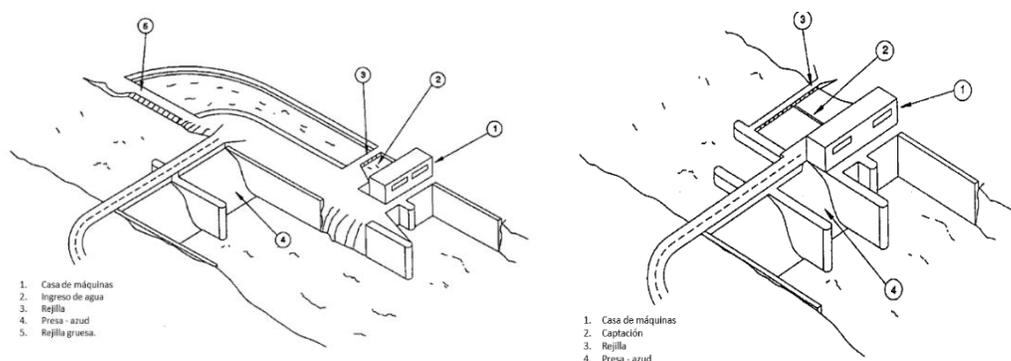


Figura 4. Esquemas a hilo de agua (Ball *et al.*, 2020).

5.8 Turbinas

Las turbinas son máquinas rotativas capaces de transformas la energía cinética en energía mecánica. Existen una amplia variedad de turbinas, como las de gas, de vapor, eólicas e hidráulicas, siendo estas últimas las de interés en este estudio. El principio de las turbinas hidráulicas tiene como base el intercambio de momento angular entre el flujo del agua y el rodete (conjunto giratorio) y se expresa a través de la ecuación de Euler (Avelino Pérez, 2016; Ball et al., 2020; Sandoval Erazo, 2018).

Las turbinas hidráulicas pueden clasificarse en dos grandes grupos, las turbinas de acción o impulso y las turbinas de reacción. En las turbinas de acción la energía potencial del flujo genera un choque con los elementos giratorios de la turbina, sin que exista una diferencia de presiones durante el proceso. La energía cinética de los chorros de agua que salen de las boquillas impactan en el conjunto giratorio, transfiriéndole energía; algunos ejemplos de estas turbinas son las turbinas Pelton, Michell-Banki (flujo cruzado) y Turgo. Por su parte, en las turbinas de reacción el rodete se mueve siempre sumergido en el agua, transformando en trabajo mecánico la energía cinética y la diferencia en los cambios de presión; entre estas turbinas se encuentran las Francis, Kaplan y Deriaz. (Ball et al., 2020; Sandoval Erazo, 2018). Un tercer tipo de motores son las máquinas hidrostáticas, las cuales se mueven por el peso del agua que llenan los baldes diseñados para este fin; un ejemplo de estas máquinas son los tornillos de Arquímedes (Ball et al., 2020)

Si se conoce la carga neta y el caudal de diseño, es posible establecer qué tipo de turbinas son las mejores para cada tipo de proyecto, ya que la eficiencia de las turbinas



cambia de acuerdo con las condiciones dentro de un rango de determinado de trabajo, carga y caudal de diseño (Sandoval Erazo, 2018).

5.8.1 Turbinas Pelton

Las Pelton son turbinas de la alta carga, pueden considerarse una evolución de la rueda hidráulica como la de los molinos antiguos. Estas turbinas constan de un rodete con álabes en forma de cuchara, los cuales son movidos por un chorro de agua que golpea los álabes en dirección tangencial (Figura 5) (Avelino Pérez, 2016; Sandoval Erazo, 2018). Esta turbina puede ser de eje horizontal o vertical y puede funcionar con uno o más inyectores. Es una máquina de impulso, ya que el rotor es movido a través de chorros mientras el rotor gira en el aire (Ball et al., 2020).

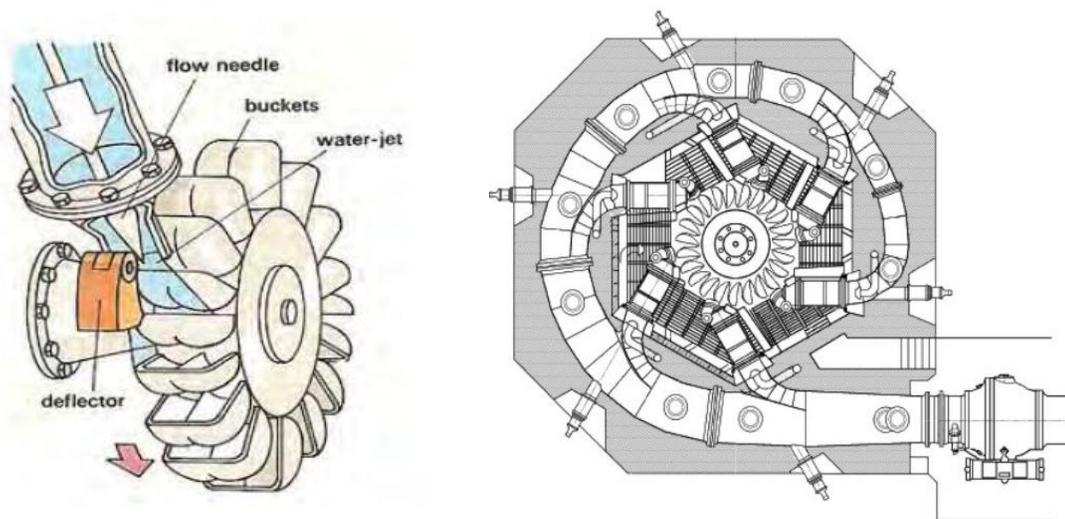


Figura 5. Turbina Pelton de uno o varios inyectores (Ball et al., 2020).

Las turbinas Pelton son muy versátiles, pueden ser utilizadas con caudales muy bajos y con cargas de 60 m u 80 m hasta 1,500 m o 1,800 m, dependiendo del autor. Estas turbinas tienen un bajo costo de mantenimiento y un rendimiento alto, que puede llegar al

90% y en ocasiones superior al 80% con el 20% del caudal nominal (Avelino Pérez, 2016; Ball et al., 2020; Zegarra Macedo, 2020).

Este tipo de turbinas pueden ser instaladas en pequeñas hidroeléctricas, con generaciones de entre 1 y 25 MW, generalmente en centrales con desvío, las cuales aprovechan mejor la carga generada por diferencias de altura (Ball et al., 2020).

5.8.2 Turbinas de flujo cruzado (Michell- Banki)

Las turbinas de flujo cruzado son también una modificación de la rueda hidráulica. Estas turbinas son de carga media y funciona como una máquina de impulso con una boquilla controlada por una sola aspa guía, la cual bloquea una porción de la periferia del rotor, de esta manera el agua que sale de la boquilla golpea los álabes situados en la periferia del rotor cilíndrico, pasa el espacio interno del rotor y cruza de nuevo el anillo de cascada de aspa al salir del corredor (Figura 6) (Ball et al., 2020)

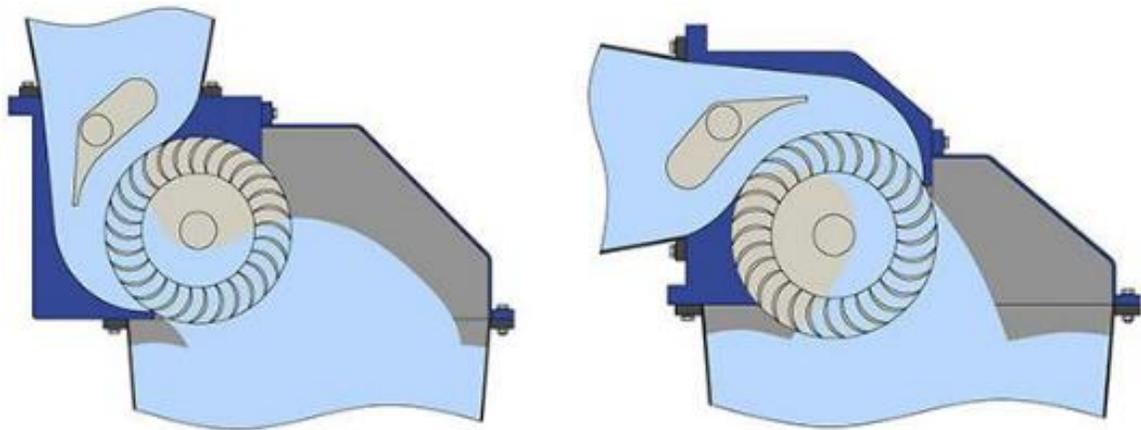


Figura 6. Turbina de flujo cruzado o Michell- Banki (Ball et al., 2020).

Este tipo de turbinas tienen un amplio rango de aplicación ya que se pueden utilizar con saltos que van de 1 a 200 m y con un importante rango de caudales. Tienen un

rendimiento máximo es de 85%, sin embargo, su rendimiento es casi constante para caudales mucho menores del caudal nominal (Zegarra Macedo, 2020). Este tipo de turbina presenta pérdidas de energía entre el borde inferior del rotor y la cola por lo que no es tan recomendable para diseños con baja carga. Las turbinas de flujo cruzado son muy utilizadas en pequeñas centrales debido a la facilidad de diseño y construcción (Ball et al., 2020).

5.8.3 Turbinas Francis

Las turbinas Francis son turbinas de reacción y son utilizadas con cargas medias. En ellas, el cuerpo de la turbina se encuentra sumergida; el agua impulsa los álabes del rodete de manera perpendicular al eje del giro y es expulsada en dirección axial (Figura 7) (Avelino Pérez, 2016; Zegarra Macedo, 2020).

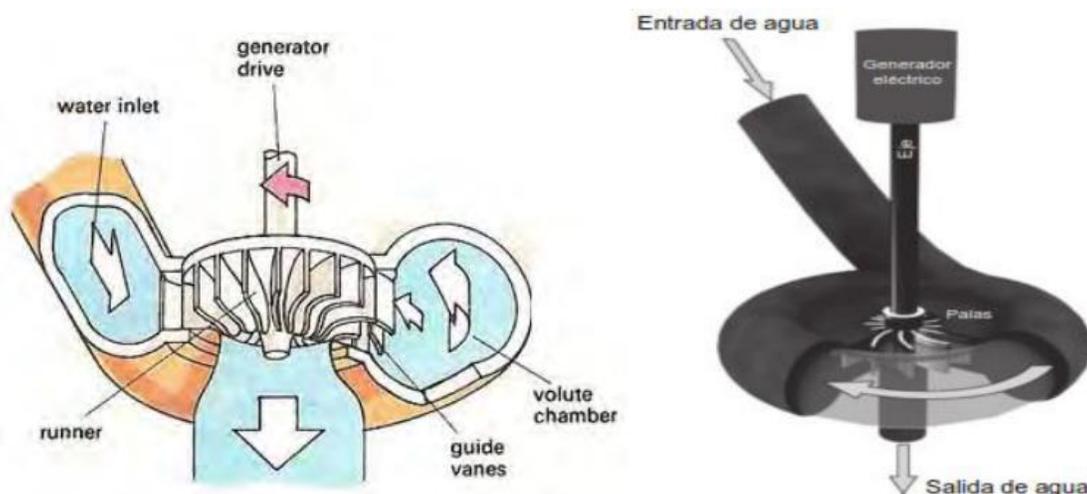


Figura 7. Turbina Francis (Avelino Pérez, 2016; Zegarra Macedo, 2020).

El flujo cambia de dirección, ingresando en sentido radial y saliendo en sentido axial respecto al eje de la turbina, la rotación puede ser horizontal o vertical y el caudal utilizado va desde 1 m³/s hasta varios cientos de metros cúbicos por segundo con cargas de entre

15 a 300 m, de 30 a 400 m o hasta 700 m, dependiendo del autor. Posee un rendimiento de 90% en condiciones óptimas y permite variaciones de caudal que van del 40% al 105% y una variación en el salto de 60% a 125% del nominal (Avelino Pérez, 2016; Ball et al., 2020; Sandoval Erazo, 2018; Zegarra Macedo, 2020).

Según Sandoval Erazo (2018), las turbinas Francis se clasifican en función de la velocidad específica del rotor y la altura de la carga:

- Francis lentas, para alturas $H > 200$ m y velocidades de entre 50 y 100 rpm.
- Francis normales, para alturas $20 \text{ m} \leq H \leq 200$ m y velocidades de entre 125 y 200 rpm.
- Francis rápidas, para alturas $H < 20$ m y velocidades de entre 225 y 500 rpm.

Esta característica permite utilizar rodets rápidos para operaciones a altas velocidades en cargas pequeñas, mientras que se pueden utilizar rodets lentos para cargas mayores (Avelino Pérez, 2016).

5.8.4 Turbinas Kaplan

En las turbinas Kaplan o de hélice, el flujo es axial, aunque existen hidroeléctricas con eje horizontal que se denominan de tipo bulbo, las cuales se caracterizan por tener poca carga y grandes caudales (Figura 8) (Avelino Pérez, 2016; Sandoval Erazo, 2018). Las turbinas Kaplan tienen un rendimiento de alrededor del 90% utilizando el caudal nominal y disminuye a medida que el caudal se reduce, por lo que generalmente se utilizan con cargas pequeñas y caudales variables o de preferencia grandes. Esto las hace las turbinas más utilizadas en condiciones de baja carga (Ball et al., 2020; Zegarra Macedo, 2020).

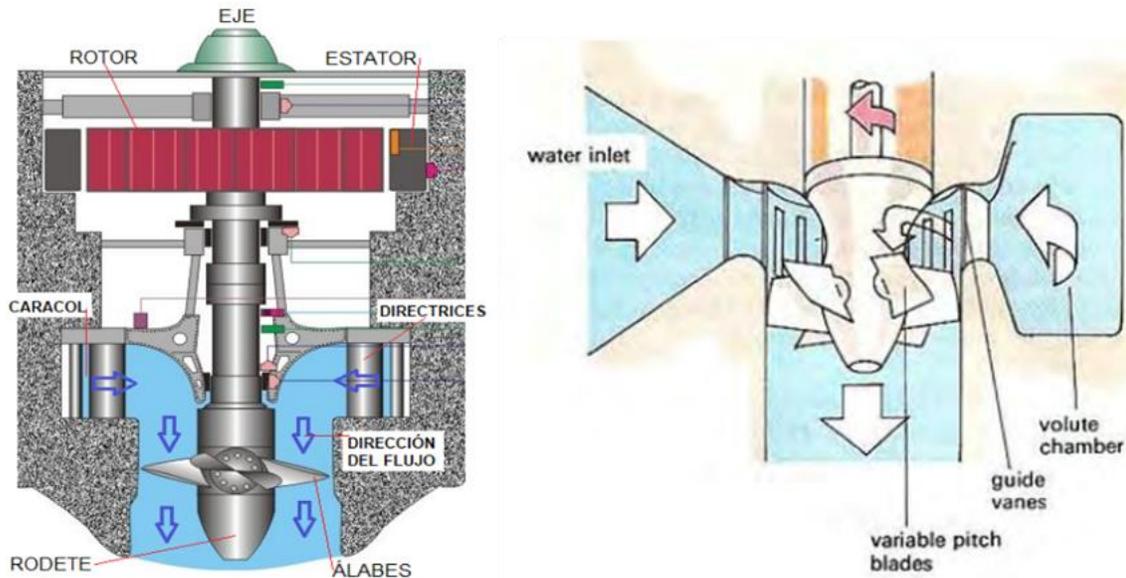


Figura 8. Turbina Kaplan (Avelino Pérez, 2016; Sandoval Erazo, 2018)

5.8.5 Selección de turbinas

La selección del tipo de turbina se realizará en función de las condiciones topográficas e hidrológicas, es decir de la carga, el caudal de diseño calculado y la eficiencia de las turbinas. Además, se deben considerar la necesidad de energía que cubrirá la central y los recursos económicos disponibles para el desarrollo del proyecto (Sandoval Erazo, 2018).

El caudal de diseño debe considerar al caudal natural en el tramo donde se construirá la derivación o embalse de la central, el caudal asignado aguas arriba del punto de derivación o embalse y el caudal ecológico aguas abajo de la derivación. De esta manera la curva de disponibilidad de caudales para el diseño de una minihidroeléctrica estará determinado por la curva de caudales medios diarios, a los cuales se le resta el caudal ecológico requerido, garantizando de esta manera la preservación de las características ambientales (Galarza Hidalgo, 2015).

Una vez determinado el caudal de diseño y la altura aprovechable es posible determinar qué turbinas pueden ser utilizadas y la potencia del equipo bajo las condiciones requeridas, en la figura 9 se pueden observar las áreas de mayor eficiencia y potencia para cada modelo general de turbinas. También es posible determinar el área de uso óptimo para cada turbina a partir de la carga y el coeficiente de rendimiento, como se muestra en la figura 10 (Avelino Pérez, 2016; Galarza Hidalgo, 2015; Sandoval Erazo, 2018; Zegarra Macedo, 2020).

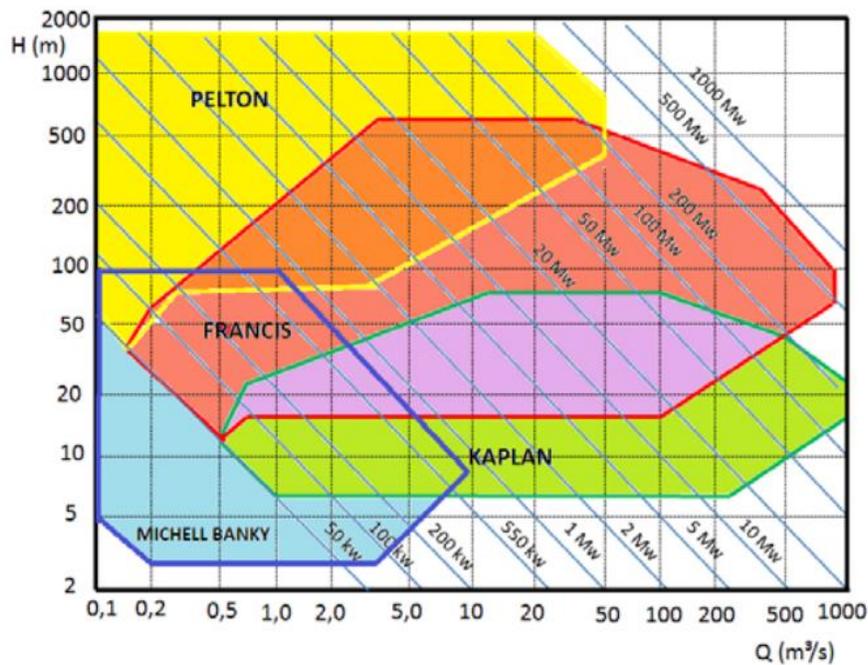


Figura 9. Grafica para selección de turbinas a partir del caudal de diseño y la altura aprovechable (Sandoval Erazo, 2018).

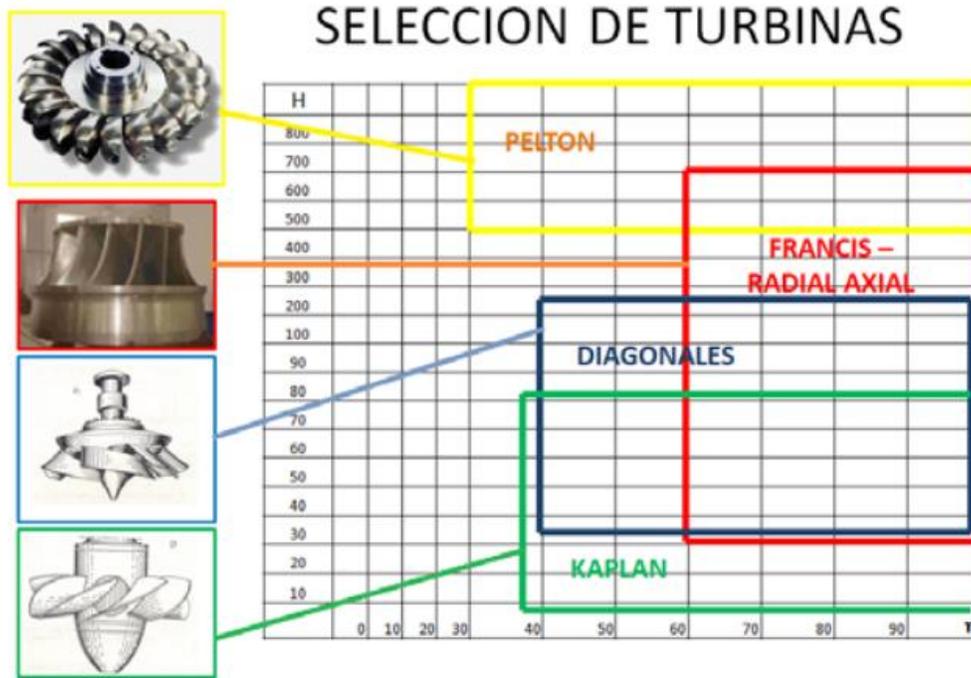


Figura 10. Área de uso óptimo para cada grupo de turbinas (Sandoval Erazo, 2018).

6 Área de estudio

La elección de la cuenca del río Verde parte de su importancia ecológica, presión de uso y su estado de conservación, atributos establecidos en la Norma Mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012, que establece el procedimiento para la determinación del caudal ecológico en cuencas hidrológicas (Diario Oficial de la Federación México, 2012; Rodríguez-Torres y Gomez-Balandra, 2013).

La NMX-AA-159-SCFI-2012 divide a la cuenca del río Verde en cuatro subcuencas: río Atoyac-Tlapacoyan, río Atoyac-Salado, río Verde y río Atoyac-Paso de la Reina. Los tres primeros poseen una importancia ecológica alta y la última importancia media, las dos primeras una presión de uso media y las dos últimas baja; en cuanto al estado de conservación, tanto las cuencas río Atoyac-Tlapacoyan, río Atoyac-Salado y río Atoyac Paso de la Reina poseen un estado de conservación bueno, mientras que la subcuenca río Verde tiene un estado de conservación muy bueno. Por su parte, los objetivos ambientales son B para río Atoyac-Tlapacoyan, río Atoyac-Salado y río Atoyac Paso de la Reina y A para río Verde (Tabla 1).

Tabla 1. Importancia ecológica, presión de uso, estado de conservación deseado y objetivo ambiental de las subcuencas del río Verde

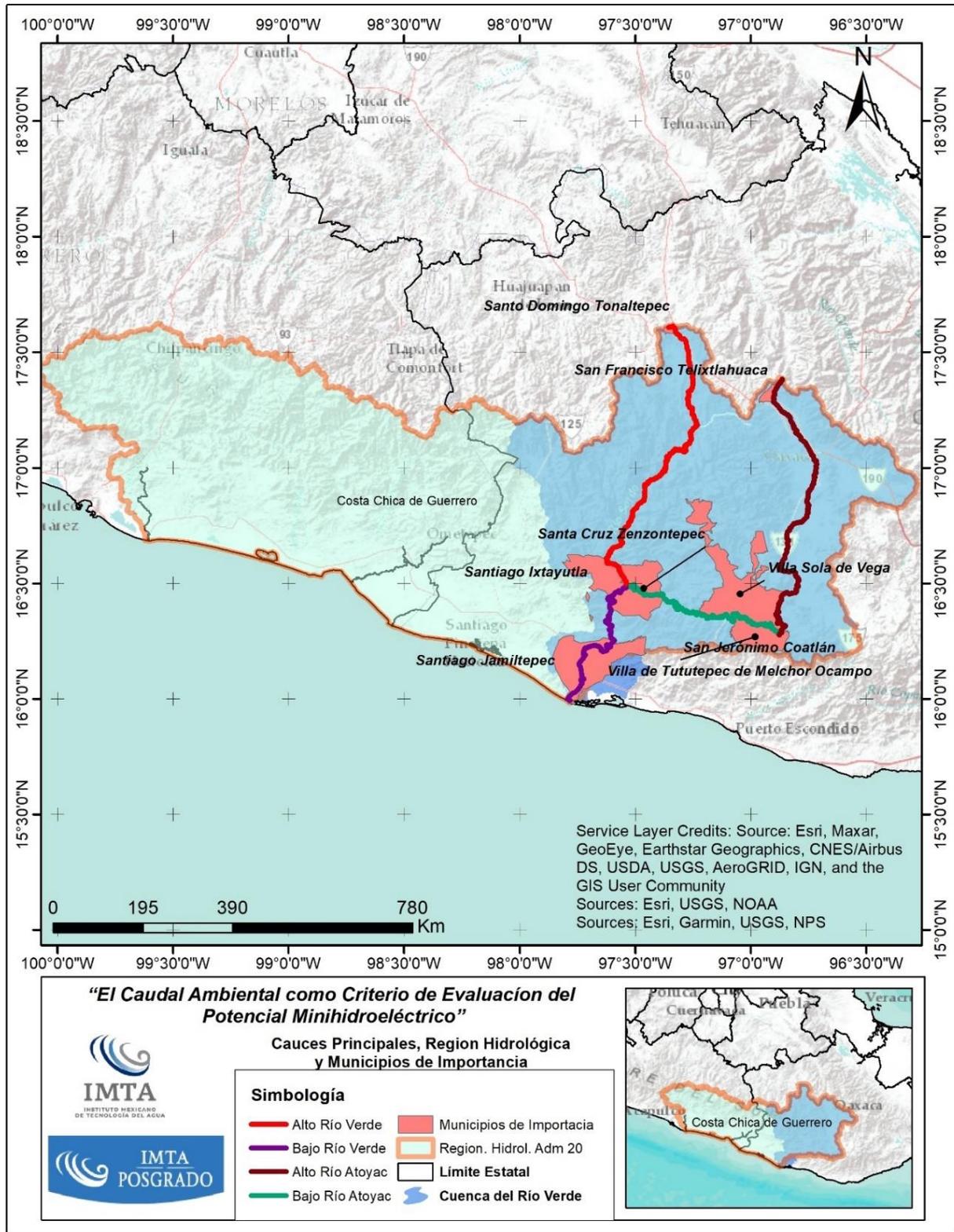
Región Hidrológica	Nombre de la Cuenca con Estudio de Disponibilidad	Importancia Ecológica	Presión de Uso	Estado de Conservación Deseado	Objetivo Ambiental
20	Río Atoyac-Tlapacoyan	Alta	Media	Bueno	B
20	Río Atoyac-Salado	Alta	Media	Bueno	B
20	Río Verde	Alta	Baja	Muy Bueno	A
20	Río Atoyac-Paso de la Reina	Media	Baja	Bueno	B

Además, existen estudios previos desarrollados en esta cuenca, especialmente sobre caudal ecológico (Gómez-Balandra et al., 2014; Torres, 2012), sedimentos (Espinoza-Ayala et al., 2011) y comportamiento del acuífero (Mejía-González et al., 2012) entre otros. Desde el punto de vista de la generación eléctrica, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) realizó estudios de factibilidad para el megaproyecto “*Aprovechamiento Hidráulico de Usos Múltiples Paso de la Reina, Oaxaca*” y la empresa Generación ENERSI, SA de CV está desarrollando el proyecto Minihidroeléctrico denominado “*Proyecto Hidroeléctrico para la Generación de Energía Renovable P.H. río Verde*”, Oaxaca (SEMARNAT, 2019). Todos estos antecedentes contribuirán al desarrollo de la presente investigación.

La cuenca del río Verde se localiza al suroeste del estado de Oaxaca, pertenece a la Región Hidrológica Administrativa V, Pacífico sur y a la Región Hidrológica No. 20 Costa Chica de Guerrero, la cual posee un área de 39,876 km² y se divide en 32 cuencas, siendo la cuenca del río Verde la más grande con un área de 18,648 km², equivalente al 46.76% del área total de la Región Hidrológica No. 20.

Toda la cuenca del río Verde se encuentra dentro del estado de Oaxaca y forma parte de la sierra Madre del sur. Posee tres vertientes principales, la del río Atoyac y la del río Verde, dividida en dos tramos que conservan el mismo nombre desde su nacimiento hasta su desembocadura en el mar y da nombre a toda la cuenca. Por su parte, el río Atoyac tiene su nacimiento al noroeste de la ciudad Oaxaca de Juárez, en el municipio de San Francisco Tlaxiuhuca, discurre en dirección sur durante 182 km hasta la frontera de los municipios de Sola de Vega y San Jerónimo Coatlán donde se desvía hacia el este, para posteriormente dirigirse en dirección noroeste por de 133 km, donde se une con el

río Verde, al sur del municipio Santa Cruz Zenzontepec. La vertiente del río Verde tiene sus orígenes al norte del municipio de Santo Domingo Tonaltepec, donde discurre en dirección Sursuroeste por 198 km, hasta la frontera de los municipios de Santiago Ixtayutla y Santa Cruz Zenzontepec, donde cambia de dirección al sureste y confluye con el río Atoyac, conservando el nombre de río Verde. Finalmente, el río Verde fluye en su última porción por 104 km en dirección sursuroeste, hasta su desembocadura en el Océano Pacífico, entre los municipios de Santiago Jamiltepec y Villa de Tututepec de Melchor Ocampo (Rodríguez y Gomez-Balandra, 2013; Rodríguez-Torres, 2012) (Mapa 1).



Mapa 1. Cauces principales, región hidrológica y municipios de importancia para el río Verde.

7 Metodología

7.1 Análisis geoespaciales

7.1.1 Modelo digital de elevación

Se descargó el Modelo Digital de Elevación (MDE) del estado de Oaxaca, el cual posee una precisión de 15 m, del portal de la biblioteca digital de mapas de INEGI (INEGI, 2022). Este MDE es un insumo que permitió establecer varias características de la cuenca con mayor precisión, como el orden de los tributarios del río Verde y la determinación de las cuencas, y por otra parte las pendientes de los ríos donde se encuentran las estaciones hidrométricas.

7.1.2 Sistemas de Información Geográfica

Se realizaron análisis geoespaciales utilizando el software ArcGis versión 10.3. Se descargaron las capas de cartografía temática en formato *shape* (.shp) con escala 1:250,000 de las características de la cuenca. Entre las capas descargadas están la cuenca, las subcuencas, los ríos principales y tributarios, los puntos de las estaciones hidrométricas, la hipsometría, uso de suelo y vegetación entre otras (INEGI, 2022).

Utilizando el MDE con resolución de 15 m como principal insumo se obtuvo el orden del río Verde y sus tributarios, posteriormente, se realizaron análisis para determinar los perfiles altitudinales de los seis ríos principales de la cuenca y se redefinieron las subcuencas a partir de los resultados anteriores, todos estos análisis se realizaron utilizando ArcMap 10.3.

7.1.3 Orden del río Verde

El orden de un río y su cuenca se determina de acuerdo con el número de ramificaciones que una corriente alcanza, una corriente de orden uno es un tributario sin ramificaciones, cuando dos corrientes de orden uno se unen forman un río de orden dos, al reunirse dos corrientes de orden dos forman una corriente de orden tres, dos corrientes de orden tres forman una de cuatro y así sucesivamente (Aparicio, 1992).

Utilizando las herramientas hidrológicas incorporadas en el software ArcMap 10.3 se determinó el orden de los ríos de la cuenca del río Verde. Este procedimiento se realizó partir del modelo digital de elevación de 15 m (INEGI, 2021) y las herramientas de dirección de flujo (*Flow Direction*) la cual determina la dirección de un cauce a partir de las variaciones topográficas, la herramienta se ubica en *ArcToolbox*, dentro de la caja *Spatial Analyst Tools* y finalmente en la caja de *Hydrology*. Posteriormente se utiliza la herramienta de acumulación de flujo (*Flow Accumulation*), la cual permite establecer el tamaño de los ríos en función de la acumulación de cauces, esta herramienta se encuentra en la caja de *Hydrology*, donde se ingresa el archivo de dirección de flujo. Posteriormente se determina la red hídrica, esta tarea se realiza con la herramienta de *Raster Calculator*, ubicada en *Spatial Analyst Tool* y la caja de *Map Algebra*, en esta herramienta se calcula el logaritmo base 10 (Log_{10}) para el archivo resultado del procedimiento de acumulación. En este punto se identifican la red de drenaje con el río principal y sus tributarios. Para evitar discontinuidades en la red de drenaje se utiliza la herramienta *Stream link* de la caja de *Hydrology*, donde se ingresan los archivos de log_{10} y dirección de flujo, obteniéndose una red hídrica continua. Como siguiente paso se define el orden del río utilizando la herramienta de *Stream Order*, contenida en la caja de herramientas *Hydrology*, donde se

ingresan la dirección de flujo y se utiliza el método de Strahler. Finalmente, se utiliza la herramienta *Stream to Feature*, donde se ingresan el orden de la red hídrica y la dirección de flujo, dando como resultado la representación gráfica en el mapa, es necesario encender los valores de orden en *Layer properties* en esta última capa, el resultado final será el valor del orden junto a cada cauce representado (Figura 11).

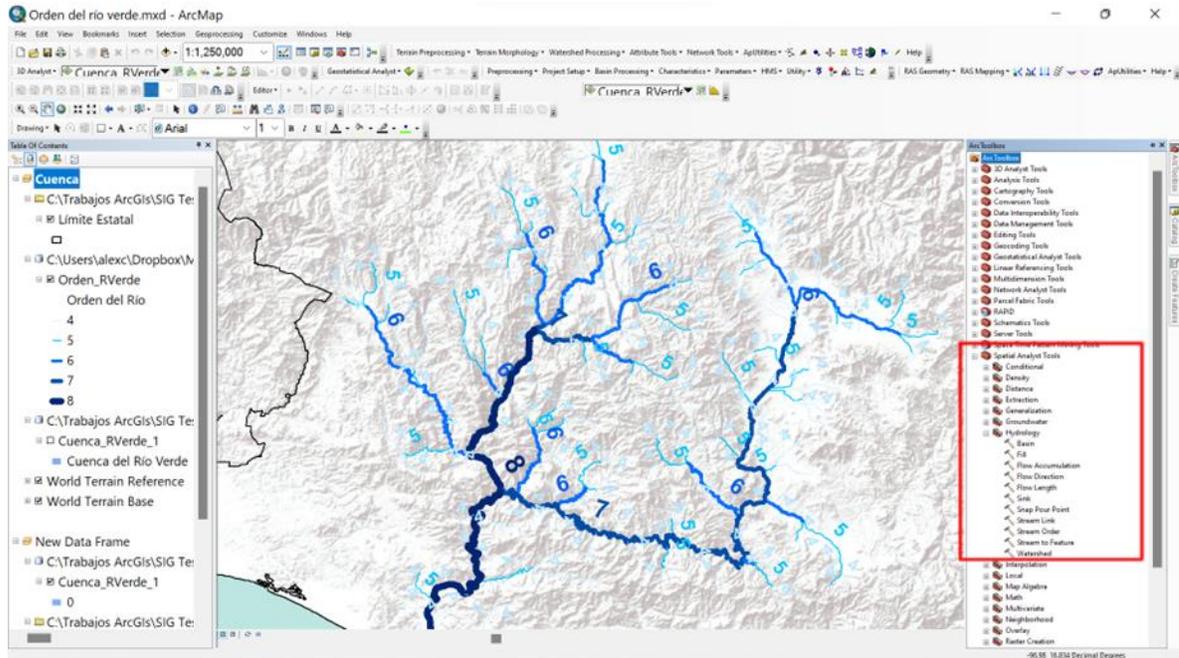


Figura 11. Proceso para obtener el orden del río Verde en ArcMap 10.3.

7.1.4 Delimitación de cuencas

Originalmente las subcuencas utilizadas en los análisis fueron las descargadas del INEGI (INEGI, 2022), sin embargo, para los fines de este trabajo y con la información obtenida con el cálculo del orden de los ríos, se decidió delimitar nuevamente las subcuencas, buscando que coincidieran con los ríos principales (de orden 6 en adelante).

La delimitación de las cuencas se realizó utilizando el ArcMap 10.3 y como principal insumo el MDE a 15 m obtenido de INEGI (INEGI, 2021). Una vez cargado el MDE en

ArcMap 10.3, se procedió a utilizar la herramienta *Fill*, la cual se encuentra en el *ArcToolBox*, en la caja de *Spatial Analyst Tools* y en *Hydrology*. Esta herramienta permite llenar los espacios vacíos que pueda tener el MDE. Posteriormente se utiliza la herramienta de *Flow Direction* de la misma caja de *Hydrology* para identificar la dirección de las corrientes en función de las pendientes. El siguiente paso es utilizar la herramienta de *Flow Accumulation*, para identificar los principales cauces, así como los puntos de descarga a cauces mayores, lagos o el mar; esta herramienta se encuentra también en la caja de *Hydrology*. Posteriormente, se crea un archivo de tipo punto, con la intención de situar los puntos de desfogue de los cauces. Una vez marcado el punto de desfogue se utiliza la herramienta *Watershed*; esta herramienta es alimentada con el archivo de dirección de flujo (*Flow Direction*) y el punto de desfogue, el resultado es una unidad hidrográfica correspondiente a ese desfogue y delimitada a partir de la divisoria de las aguas obtenida desde del punto más alto dentro de ese cauce. Este archivo resultante es de tipo *raster* por lo que debe ser convertido a formato vectorial para su mejor manejo; esto se utiliza la herramienta de *Raster to Polygone*, localizada en la caja de *Conversion Tools* y en *From Raster*; en esta herramienta se introduce el archivo de *Watershed* previamente obtenido. El resultado final es la delimitación de cada cuenca en función de su punto de desfogue y el MDE de 15 m (Figura 12).

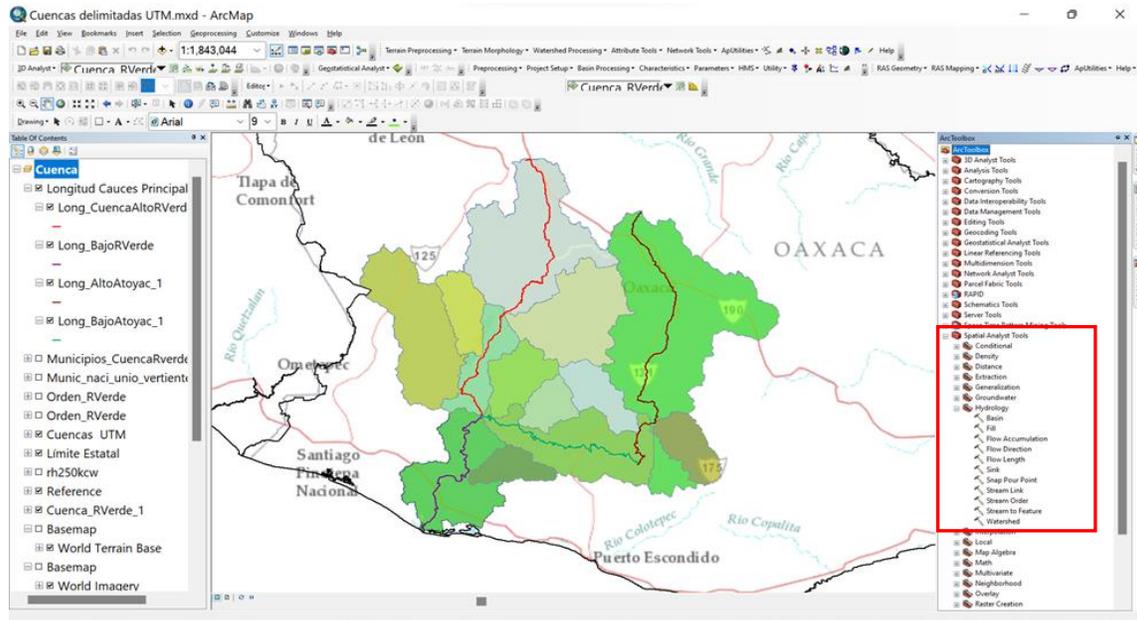


Figura 12. Proceso de delimitación de cuencas en ArcMap 10.3.

7.2 Análisis hidrológicos

7.2.1 Estaciones hidrométricas

Una vez seleccionada la cuenca del río Verde como el área de estudio, se procedió a coleccionar información de sus características hidrológicas, determinando las estaciones hidrométricas, su localización y todos los registros hidrológicos disponibles para cada estación. La información hidrológica se obtuvo de la Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2022), extrayendo la información del catálogo de estaciones hidrométricas y de las bases de datos hidrométricos. Las estaciones fueron ubicadas geográficamente utilizando la información obtenida de la biblioteca digital de mapas de INEGI (INEGI, 2022).

7.2.2 Perfil longitudinal del río Verde y sus tributarios

La pendiente de los ríos se obtuvo utilizando el mapa de la red hídrica obtenido al calcular el orden de los ríos de la cuenca del río Verde. Par cada uno de los ríos principales se extraen los datos, este procedimiento se realiza dando un clic izquierdo sobre la capa de orden del río y seleccionando *Export Data...* seleccionado el río en el que se quiere identificar el perfil altitudinal. Si el río se encuentra en diferentes polilíneas se unen utilizando el *Editor* y la herramienta *Merge*, formando una sola polilínea. Posteriormente, se carga en ArcMap el MDE y utilizando la barra de *3D Analyst* y la herramienta de *Interpolate Line*. El resultado es una polilínea con referencia altitudinal. Finalmente, en la misma barra 3D Analyst se da clic a la herramienta *Point Profile* y la opción de *Profile Graph*. El resultado obtenido es una gráfica de pendiente para cada río analizado (Figura 13)

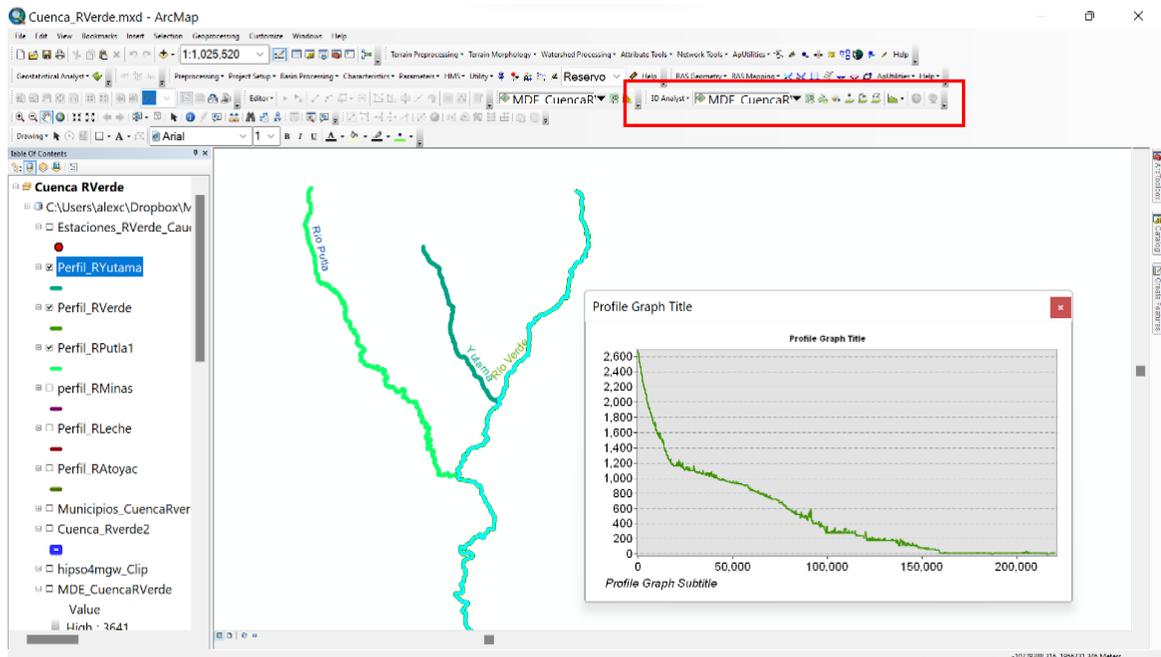


Figura 13. Determinación del perfil longitudinal del río Verde en ArcMap 10.3.

7.2.3 Herramientas Hidrológicas

Se descargó el programa Indicadores de Alteraciones Hidrológica (IHA-TNC) versión 7.1 de la organización *The Nature Conservancy* (Figura 14). Se consultó el manual de usuario del programa y se tomó el curso en línea de *Indicators of Hydrological Alteration*, para el manejo adecuado del programa.



Figura 14. Indicadores de alteración hidrológica (IHA), Versión 7.1.

A partir de las bases de datos obtenidas del BANDAS en formato .MDB se crearon nuevas bases de datos con formato .CSV, que es el formato requerido en el programa IHA-TNC. Con este procedimiento se inició el proceso para calcular los parámetros hidrológicos y de componentes del caudal ecológico que son relevantes durante la operación de las centrales minihidroeléctricas. Se identificaron algunos indicadores de alteración hidrológica propuestos por el manual de alteraciones hidrológicas de IHA (The

Nature Conservancy, 2011), para determinar los límites de bajos de los caudales ambientales.

Utilizando los datos de las estaciones hidrométricas de la cuenca del río Verde se realizaron los análisis hidrológicos en el programa IHA 7.1. Se determinó el régimen natural de las subcuencas y se obtuvieron las características de los caudales ecológicos.

Entre las características del régimen natural de las subcuencas, se determinaron los días con caudal 0, los caudales mínimos para 1 día, los caudales extremadamente bajos y los componentes de caudal ecológico. En el caso de los componentes de caudal ecológico se incluyen los caudales extremadamente bajos, los caudales bajos, los pulsos de caudal alto, las pequeñas inundaciones y las grandes inundaciones, estos componentes se basan en el estudio de los hidrogramas. En estos modelos deben mantenerse la gama de condiciones de caudal que tienen influencia sobre los diferentes modelos de ecosistemas, de esta gama de condiciones los cinco componentes se consideran los más relevantes (The Nature Conservancy, 2011).

Como primer paso en el uso del programa IHA 7.1 es necesario importar los datos hidrológicos, en este caso los datos se importaron en formato .CSV, correspondiente a un formato genérico de dos columnas separadas por comas, donde la primera contiene la fecha en formato día/mes/año, donde el día y el mes constan de dos caracteres y el año de cuatro, mientras que la segunda fila posee el valor del caudal promedio diario en metros cúbicos por segundo, en el caso de que los datos faltantes se utiliza el valor de 999999, para que el programa lo identifique como un dato faltante. Además, al ser cargados los datos el programa aumenta una tercera columna con el día Juliano (Figuras 15 y 16).

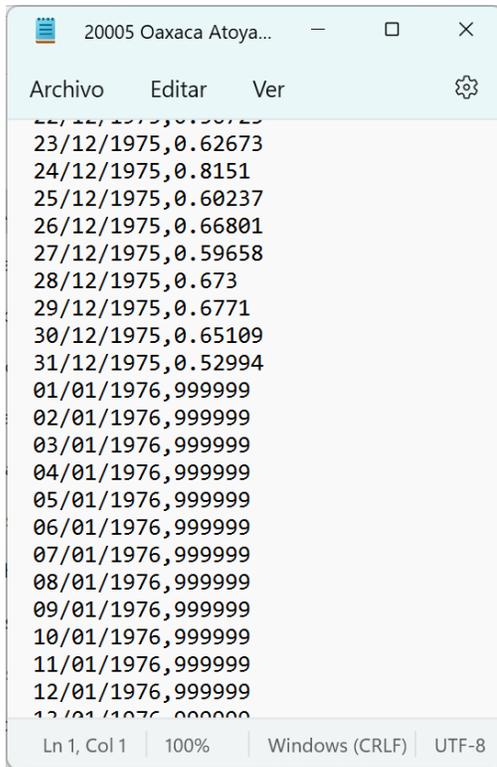


Figura 15. Archivo formato .CSV.

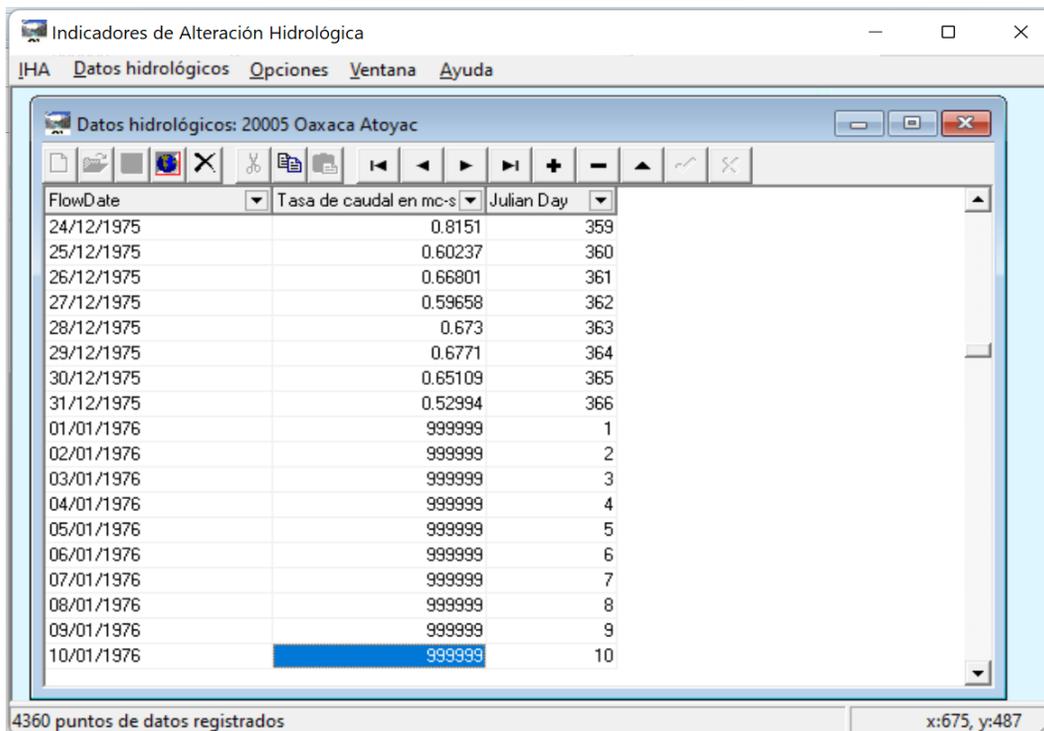


Figura 16. Importación de datos hidrológicos del programa IHA, estación Oaxaca Atoyac.

Como siguiente paso se abre la pestaña de lista de análisis y se procede a establecer un análisis nuevo (Figura 17). En este caso se pueden realizar análisis personalizados, copiar análisis preexistentes y se puede acceder a un asistente que guía a través de las diferentes opciones de análisis. Las opciones disponibles se encuentran en seis pestañas que corresponden el título del análisis, los años del análisis, los días de análisis (P.E. Estiaje o lluvias, mes más lluvioso o mes más seco), las estadísticas (paramétricas o no paramétricas), los componentes de caudal ecológico (límites de los caudales altos y bajos) y las curvas de duración de caudales (años de análisis para la curva) (Figura 18).

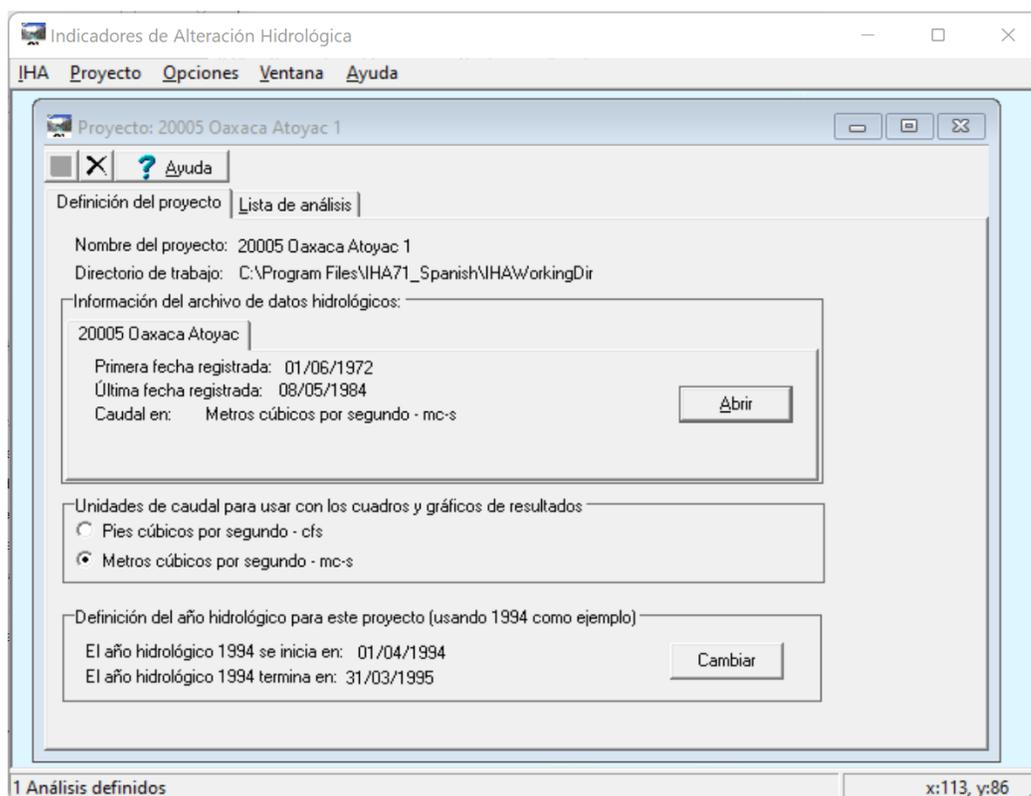


Figura 17. Proyecto de la estación Oaxaca Atoyac

Figura 18. Propiedades del análisis del programa IHA.

Una vez establecidas las características del análisis, se ejecuta y posteriormente se abre la opción de “Ver resultados”. El programa IHA 7.1 arroja los resultados en dos formatos generales: cuadros y gráficos. En la opción de cuadros se presenta una hoja de cálculo con siete pestañas: un cuadro de resumen de datos anuales (ann), un cuadro de resumen de datos por periodo (sco), un cuadro de regresión (lsq), un cuadro de percentiles (pct), un cuadro de componentes de caudal ecológico o EFC de efecto diario (daily efcs), un cuadro de curvas de duración de caudales (fdc) y los mensajes de alerta (msg) (Figura 19).

De todos los cálculos realizados y resumidos en el cuadro, el más importante para los fines de este estudio se encuentra en la pestaña de percentiles (pct) y corresponde a la *EFC Monthly Low Flows* o Caudales Bajos Mensuales (CBM), dentro de los componentes de caudal ecológico (Figura 20).

Por su parte, al pulsar la opción de gráfico nuevo, se despliega una pantalla con varias pestañas, entre las que se encuentran: *Gráficos anuales*, *Otros gráficos* y *Curvas de duración de caudales*. De todas las opciones de gráficos que el programa puede calcular se utilizaron solo siete:

Año	Apr-Abril	Mayo	Junio	Julio	Aug-Agosto	Septiembre	Octubre
1972	0.028	0.028	3.464	0.916	2.331	1.093	0.113
1973	0	0	0.2075	2.013	8.199	15.86	3.731
1974	0	0	1.521	9.504	2.289	2.72	3.894
1975	0	0.3157	1.889	5.406	1.673	14.67	4.326
1976	0.4529	0.4309	0.4088	0.3868	0.3644	0.3423	0.3203
1977	0.1883	0.1663	0.1442	0.1222	0.09977	0.07772	0.05567
1978	0	0	0.0535	0.042	0.158	0.1485	0.823
1979	0	0	0.0285	0.154	0.173	6.913	0.862
1980	0	0.088	0	0.135	5.364	2.879	2.569
1981	0.029	0.029	12.52	9.688	15.61	14.98	4.026
1982	0.064	0.701	0.176	0.111	0.064	0	0.035
1983	0	0	0	0.552	0.205	1.404	0.06
1984	0	0	0	0	0	0	0

Figura 19. Cuadro resumen de resultados para la estación Oaxaca Atoyac.

Month	Low Flow
Apr-Abr	0.028
Mayo	0.028
Junio	0.079
Julio	0.057
Aug-Agos	0.057
Septiemb	0.0765
Octubre	0.035
Noviembr	0.03362
Dec-Dici	0.0085
Jan-Ener	0.0265
Febrero	0.014
Marzo	0.007

Figura 20. Caudales bajos mensuales de la estación Oaxaca Atoyac.

7.2.4 Días con caudal cero

El primer análisis realizado fue el conteo de los días con caudal cero para cada estación. Este análisis se realizó utilizando la opción de *Ver resultados*, en la pestaña de *Gráficos de datos anuales*, *Parámetros IHA* y *Otro*. Esta grafica establece el número de días con caudal cero para todo el periodo con registros hidrométricos (Figura 21).

7.2.5 Curva de duración de caudales

Las curvas de duración de caudales indican el porcentaje de tiempo en el cual el río alcanza o excede un cierto valor de caudal. En el programa de IHA, el cálculo de esta serie de curvas se realiza utilizando la opción de *Ver Resultados*, *Gráfico Nuevo*, *Curvas de duración de caudales* y finalmente se escogen los meses para realizar las curvas o bien la opción de cálculo anual (Figura 22).

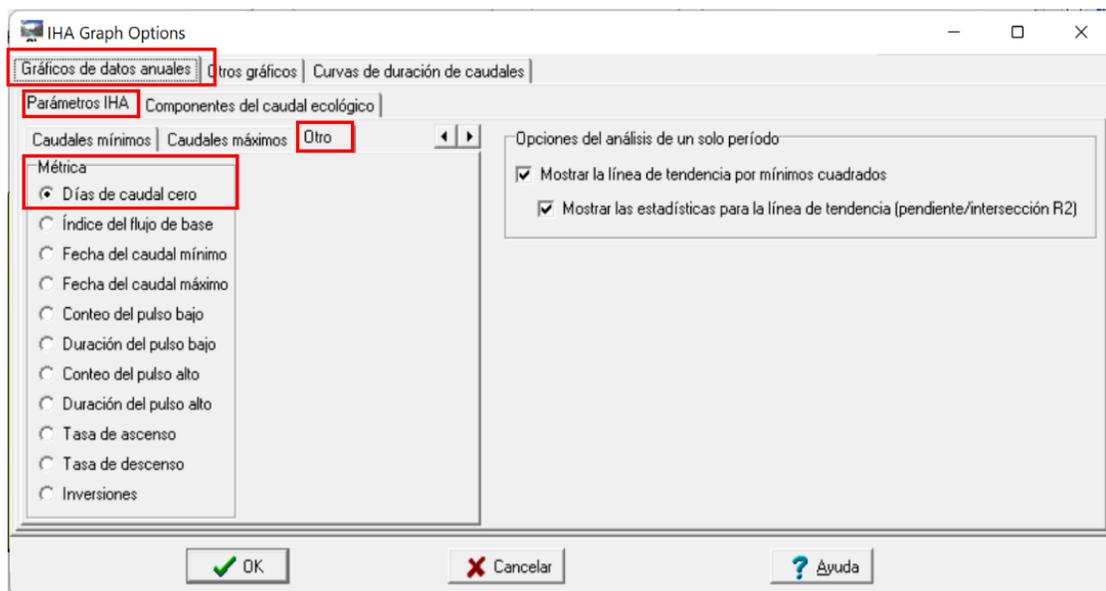


Figura 21. Obtención de la gráfica de días con caudal cero.

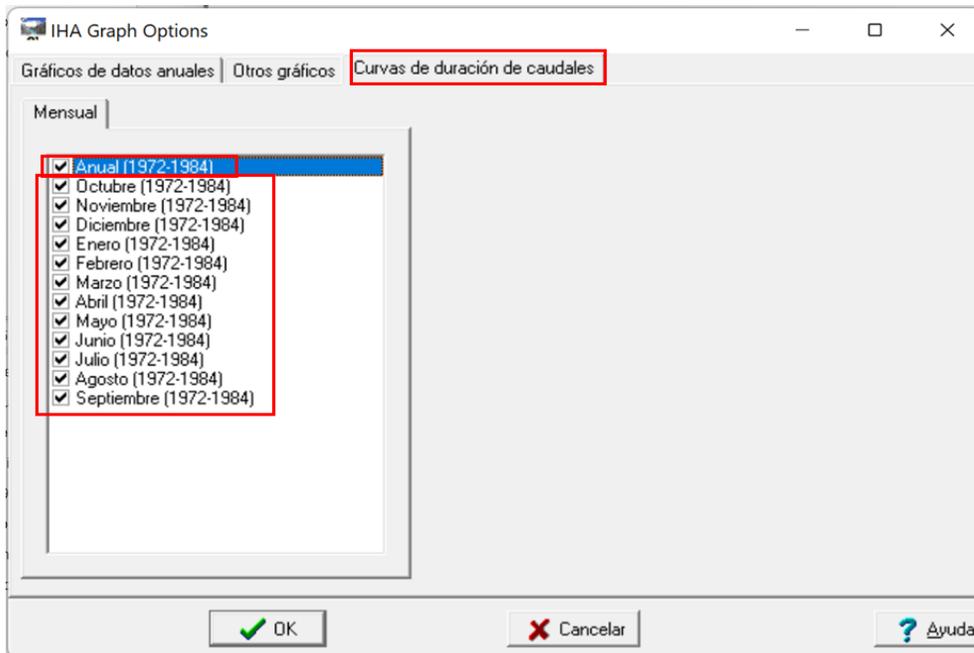


Figura 22. Obtención de las gráficas de curvas de duración de caudales.

7.2.6 Caudales extremadamente bajos

El umbral de los caudales considerados como caudales extremadamente bajos se establece utilizando el percentil 10 de los caudales bajos diarios. Los picos de los caudales extremadamente bajos para un día corresponderán con los caudales mínimos para un día (The Nature Conservancy, 2011) . Este componente de caudal ecológico se calcula en la opción de *Ver resultados, Gráficos de datos anuales, Componentes de caudal ecológico, Other Event Types* (esta pestaña se encuentra en inglés), en *Tipo de evento* se selecciona la opción de *Extreme Low Flows* y finalmente en métrica se selecciona la opción *Pico* (Figura 23).

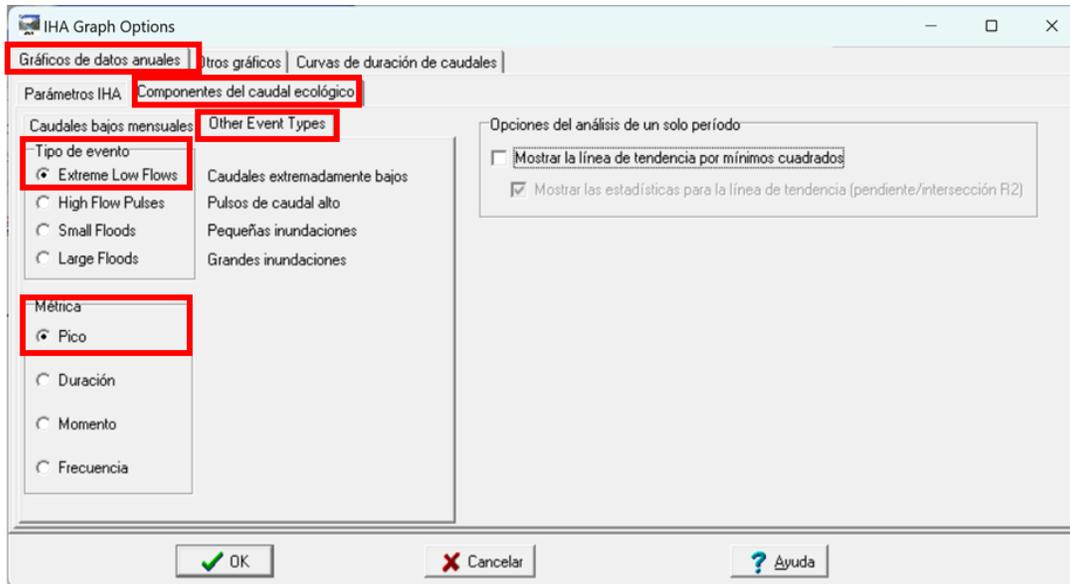


Figura 23. Obtención de la gráfica de caudales mínimos para 1 día

7.2.7 Duración de caudales extremadamente bajos

Este parámetro expresa en número de días continuos, la duración de los caudales extremadamente bajos para el periodo estudiado. Este parámetro arroja información sobre la duración de las condiciones de alto estrés hídrico. Se calcula en la opción de *Ver resultados*, *Gráficos de datos anuales*, *Componentes de caudal ecológico*, *Other Event Types* (esta pestaña se encuentra en inglés), en *Tipo de evento* se selecciona la opción de *Extreme Low Flows* y en *Métrica* se selecciona *Duración* (Figura 24).

7.2.8 Frecuencia de caudales extremadamente bajos

La frecuencia de caudales extremadamente bajos determina la cantidad de veces al año en la que ocurren los caudales extremadamente bajos. Este parámetro es también un indicador de la frecuencia anual en la que los ríos presentan el mayor estrés hídrico a lo largo de un año. Se calcula en la opción de *Ver resultados*, *Gráficos de datos anuales*, *Componentes de caudal ecológico*, *Other Event Types* (esta pestaña se encuentra en

inglés), en *Tipo de evento* se selecciona la opción de *Extreme Low Flows* y en *Métrica* se selecciona *Frecuencia* (Figura 25)

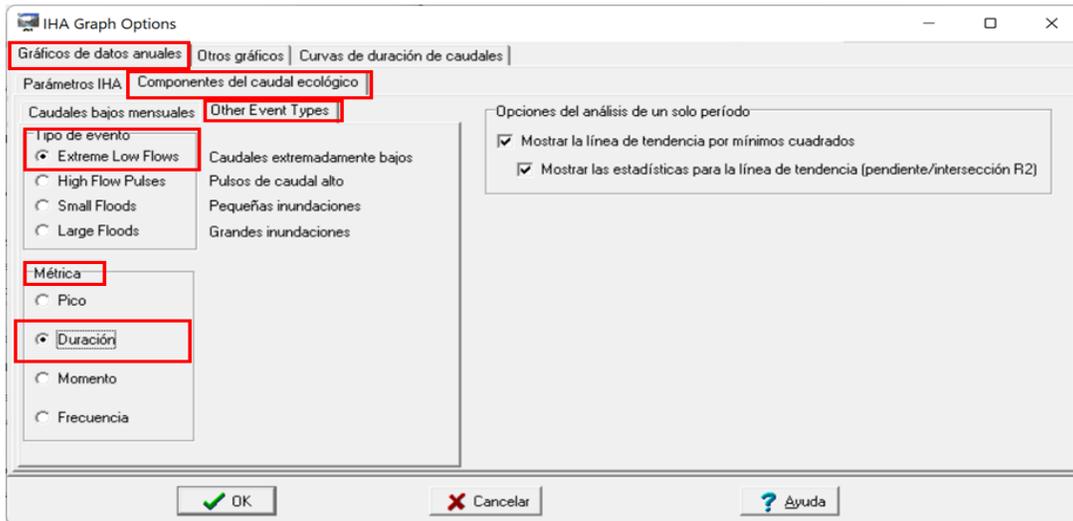


Figura 24. Obtención de la gráfica de duración de caudales extremadamente bajos.

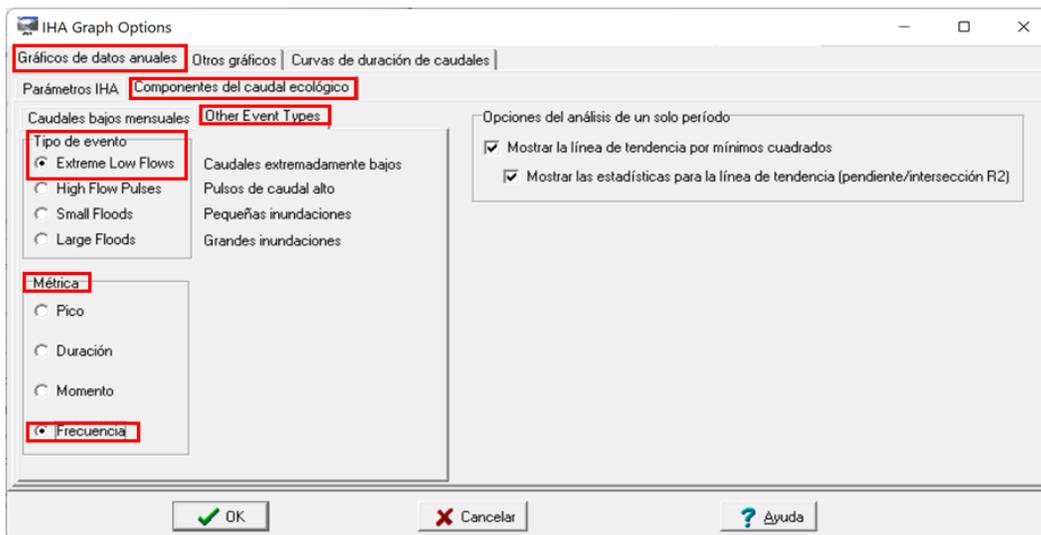


Figura 25. Obtención de la gráfica de frecuencia de caudales extremadamente bajos.

7.2.9 Caudal diario promedio

Se calculó el caudal promedio para cada día del año, utilizando todos los datos de caudal correspondientes a los 366 días del año (incluyendo los 29 de febrero), para todos los años con registro. Este procedimiento se realizó utilizando la hoja de cálculo de *Microsoft Excel* (Figura 26) a partir de los datos obtenidos de la pestaña de *resultados de efectos diarios* del programa IHA 7.1. Debido a que las diferencias de caudales pueden tener diferencias muy amplias entre periodos de lluvia y estiaje, y con el fin de mejorar la comprensión de los caudales más bajos, se utilizó una escala logarítmica para graficar los resultados.

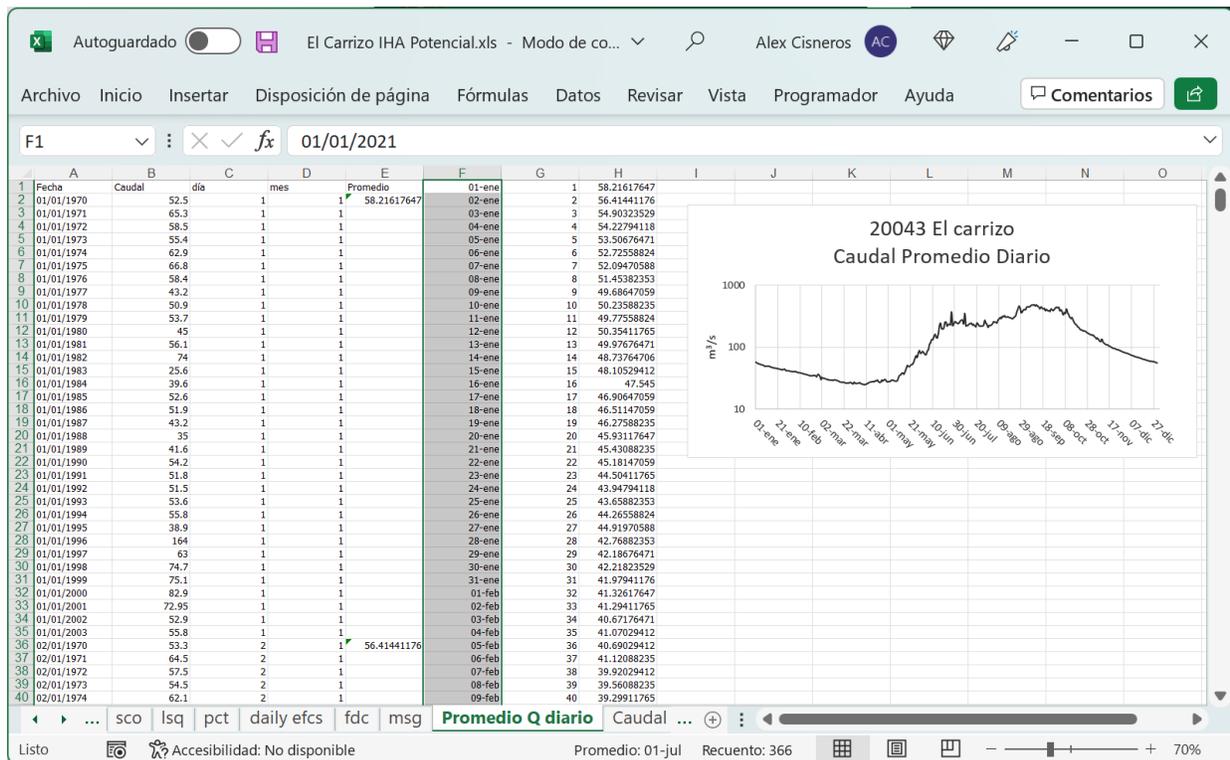


Figura 26. Cálculo del caudal promedio para cada día del año de la estación El Carrizo.

7.3 Determinación del potencial minihidroeléctrico

Una vez calculado el caudal diario promedio se procedió a calcular el potencial minihidroeléctrico, el cual se realizó utilizando la siguiente ecuación:

$$P = \gamma * Q * H * ns * 9.81$$

Donde P es el potencial eléctrico en kilovatios (kW), Q es el caudal medio (m^3/s), γ es el peso específico del agua ($\approx 1,000 \text{ kg}/m^3$), H carga hidráulica disponible (m), obtenida de la diferencia ente el nivel de aguas máximas ordinarias y la turbina, ns es la eficiencia total de la planta, generalmente entre 75 y 90 (%) y 9.81 es la aceleración de la gravedad (m/s^2) (Avelino Pérez, 2016; BHA, 2005; Meza-Prieto y Aparicio, 2018; Palacios-Fonseca et al., 2017; Sandoval Erazo, 2018; Trelles Jasso et al., 2007).

Para el cálculo del potencial hidroeléctrico bruto en los sitios seleccionados, se utilizaron los valores de caudales diarios promedio de todo el periodo con registros, una eficiencia total de la planta de 85% según lo propuesto por Rivas-Carpio (2013) y tres diferentes escenarios de carga hidráulica correspondientes a 10, 50 y 100 m, los cuales fueron establecidos a partir del análisis de las características topográficas de los sitios. Este cálculo arrojó como resultado un valor de potencial promedio para cada día del año.

El cálculo se realizó utilizando la base de datos de cada estación hidrométrica con datos diarios promedio de caudal y se procesó utilizando a hoja de cálculo de *Microsoft Excel* (Figura 27).

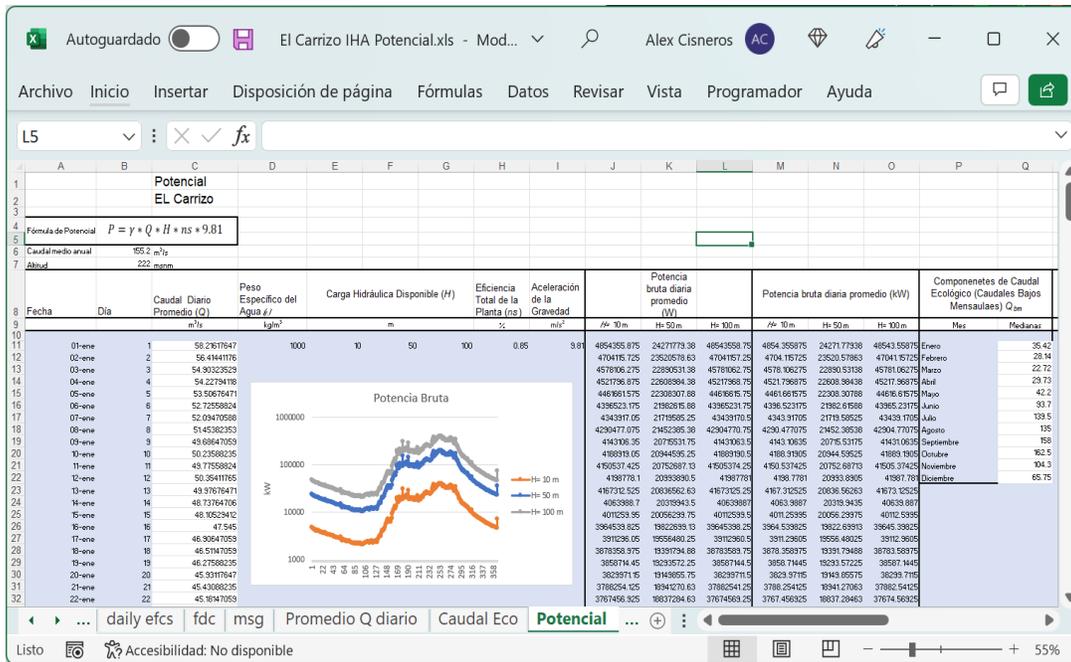


Figura 27. Cálculo del potencial minihidroeléctrico de la estación El Carrizo.

7.4 Caudales Bajos Mensuales (CBM) y potencial minihidroeléctrico

De todos los componentes del caudal ecológico, el de mayor interés para evaluar el potencial minihidroeléctrico es el del Caudal Bajo Mensual (CBM) para cada estación, obtenido utilizando el programa IHA. Este valor representa el caudal mínimo que permite que los ecosistemas mantengan su integridad y funcionamiento y es obtenido como la mediana de los caudales bajos para cada mes. El cálculo se obtiene en la opción de *Ver resultados*, *Ver Cuadros*, posteriormente se abre la pestaña *pct* (cuadro de percentiles) y se toman los valores del percentil 50 en el cuadro de *EFC Monthly Low Flows* (en inglés), para cada mes (Figura 28).

	A	B	C	D	E	F	G
50							
51	EFC Monthly Low Flows	10%	25%	50%	75%	90%	(75-25)/50
52	Apr-Abr caudal bajo	0.34	0.3675	0.385	0.4625	0.48	0.2468
53	Mayo caudal bajo	0.36	0.375	0.4	0.405	0.75	0.075
54	Junio caudal bajo	0.36	0.4125	0.5975	0.93	1.145	0.8661
55	Julio caudal bajo	0.41	0.5725	0.99	1.216	1.36	0.6503
56	Aug-Agos caudal bajo	0.57	0.7138	1	1.258	1.305	0.5437
57	Septiemb caudal bajo	0.73	0.98	1.18	1.3	1.35	0.2712
58	Octubre caudal bajo	0.75	0.86	1.16	1.3	1.35	0.3793
59	Noviemb caudal bajo	0.5	0.55	0.705	0.94	1.03	0.5532
60	Dec-Dici caudal bajo	0.45	0.465	0.51	0.635	0.655	0.3333
61	Jan-Ener caudal bajo	0.36	0.385	0.4	0.505	0.55	0.3
62	Febrero caudal bajo	0.33	0.335	0.35	0.4	0.45	0.1857
63	Marzo caudal bajo	0.33	0.3325	0.4	0.4038	0.5	0.1781

Figura 28. Cuadro de resultados del IHA de la estación Yutama, pestaña pct (percentiles) y valores del percentil 50 del cuadro EFC Monthly Low Flows.

De esta manera, el procedimiento con el cual se determinó el potencial minihidroeléctrico a partir de los valores de CBM se realizó restando los CBMs a los valores de caudal diario promedio. Esto permitió establecer los valores de caudales mínimos diarios con los cuales se puede recalculer el potencial hidroeléctrico para los tres escenarios de carga (H=10, 50 y 100 m), respetando las necesidades ambientales de las estaciones hidrométricas consultadas. El cálculo se realizó utilizando la hoja de cálculo de Microsoft Excel (Figura 29).

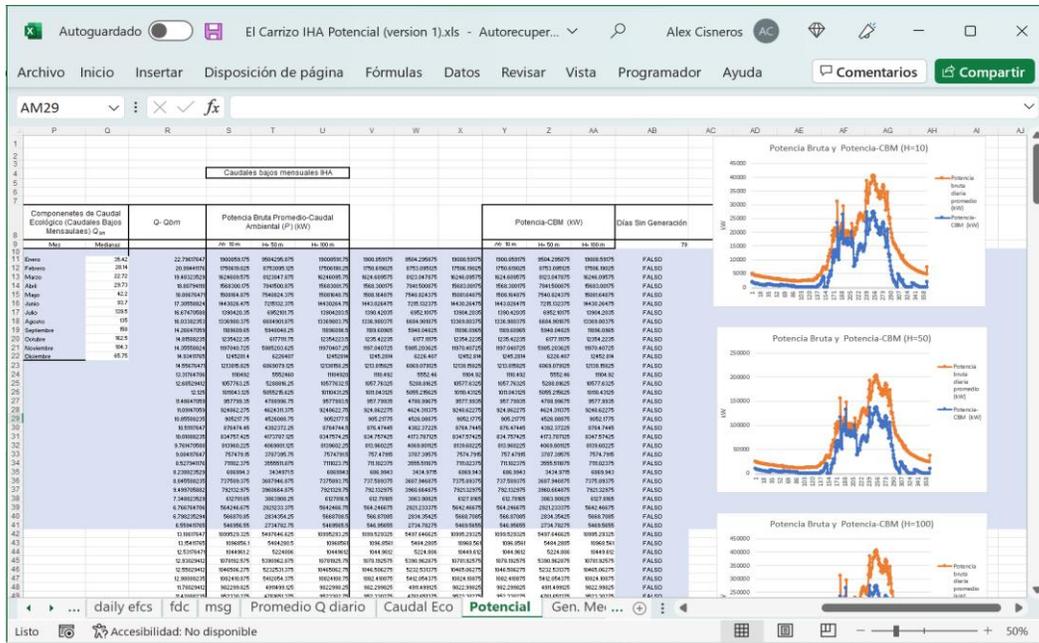


Figura 29. Cálculo del caudal disponible restando el CBM y recálculo de la potencia disponible.

7.5 Curva de duración de caudales utilizando el caudal promedio diario menos los caudales bajos mensuales

Las curvas de duración de caudales permiten determinar el porcentaje de tiempo en que ocurre o se excede un caudal determinado, lo que establece la disponibilidad de caudal a lo largo un periodo de tiempo estudiado sin considerar la secuencia en que los caudales se presentan. Por otra parte, los caudales bajos mensuales conservan características hidrológicas mínimas para mantener hábitats adecuados en los ecosistemas fluviales. Al utilizar el caudal producto de la resta de los caudales bajos mensuales al caudal diario promedio, se puede obtener una curva que indique la disponibilidad una vez que se haya reservado el caudal que satisface las necesidades ambientales mínimas.

Para la construcción de esta curva de duración de caudales se utilizó el software *Microsoft Excel*. Como primer paso se calcularon los valores de caudal restando los caudales bajos mensuales a los valores del caudal diario promedio. Posteriormente, se identificó el número total de datos, correspondiente 366 días, así como los valores máximos y mínimos. Se calculó el rango total de los datos restando al valor máximo al mínimo y se calculó el incremento distribuido en 366 intervalos. Una vez calculado el caudal se obtuvo la frecuencia de aparición de cada valor, así como el porcentaje que aporta al total de observaciones. Finalmente, al sumar el porcentaje se obtiene la frecuencia acumulada o probabilidad de excedencia (Figura 30). Esta probabilidad de excedencia se grafica utilizando un *gráfico X Y (dispersión)*, donde se coloca la probabilidad de excedencia en el eje X y el caudal en el eje Y (Figura 31).

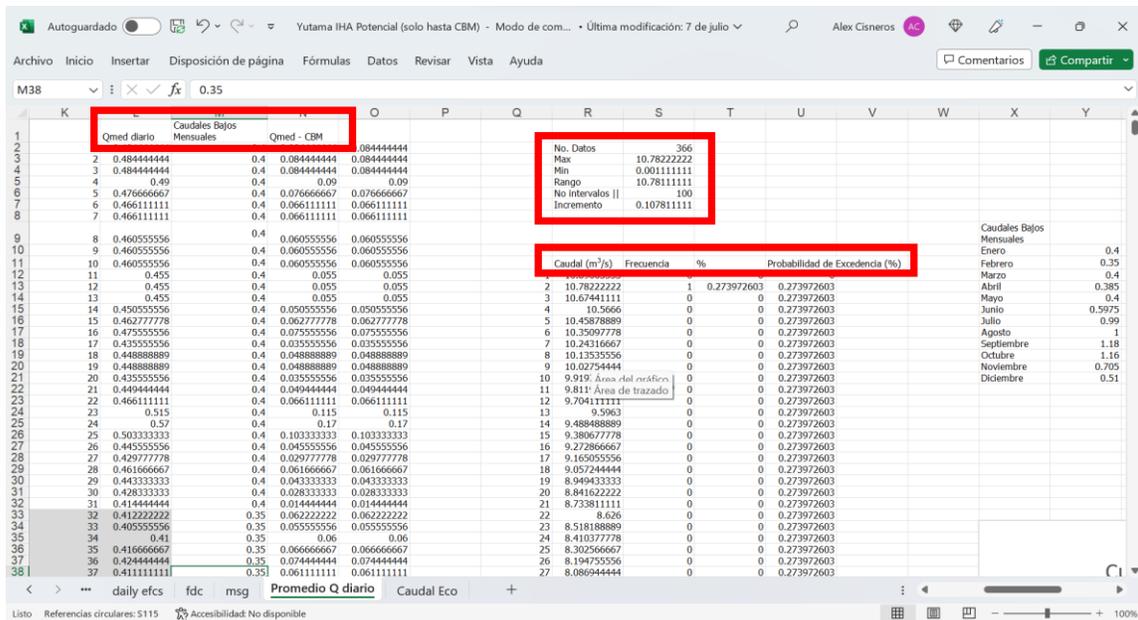


Figura 30. Cálculo de la frecuencia acumulada para curva de duración de caudales.

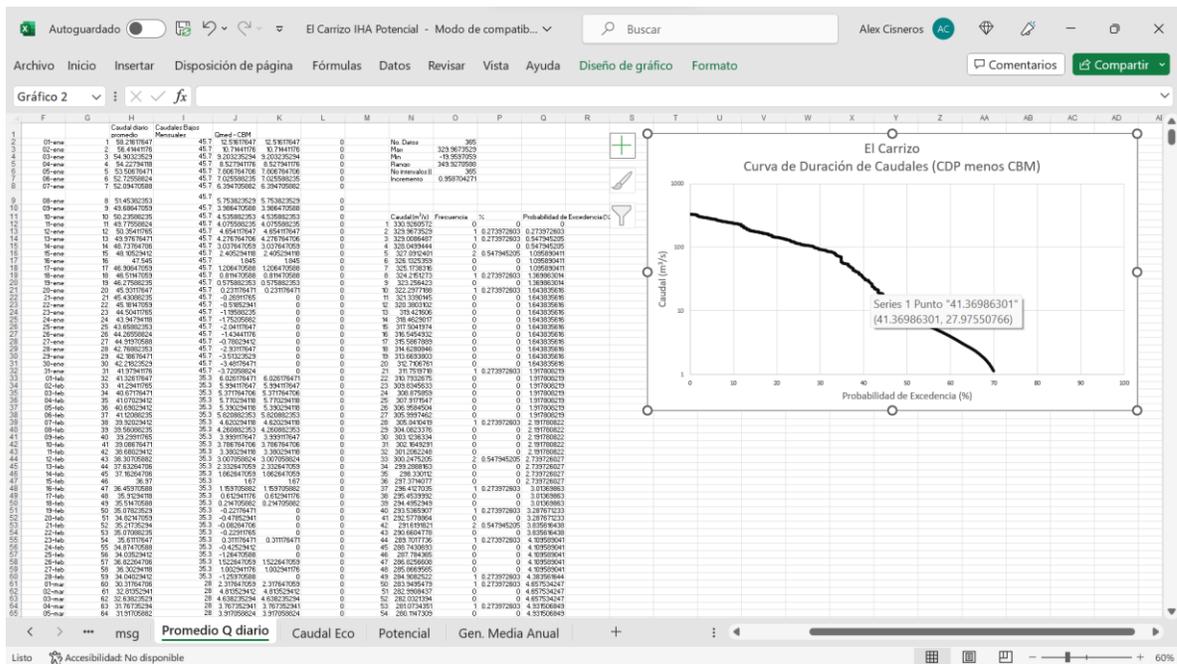


Figura 31. Cálculo de la frecuencia acumulada para curva de duración de caudales.

7.6 Determinación de equipos adecuados para cada estación con potencial minihidroeléctrico

Como último paso se analizaron los equipos más apropiados a partir de las características obtenidas de caudal y carga, este análisis se realizó utilizando la Figura 9 para la selección de las turbinas tomada de Sandoval Erazo (2018). De esta manera se sobrepusieron en la gráfica la altura aprovechable, con valores de entre 10 y 100 correspondientes a los tres escenarios propuestos en los análisis anteriores, y como valor de caudal se utilizó el valor más alto de la resta del caudal bajo mensual al caudal promedio diario; finalmente se señaló el área de potencia entre 100 kW y 1 MW, que corresponden a la potencia atribuida a las centrales minihidroeléctricas (Figura 32) (Chen et al., 2020; Sandoval Erazo, 2018; Tkáč, 2018).

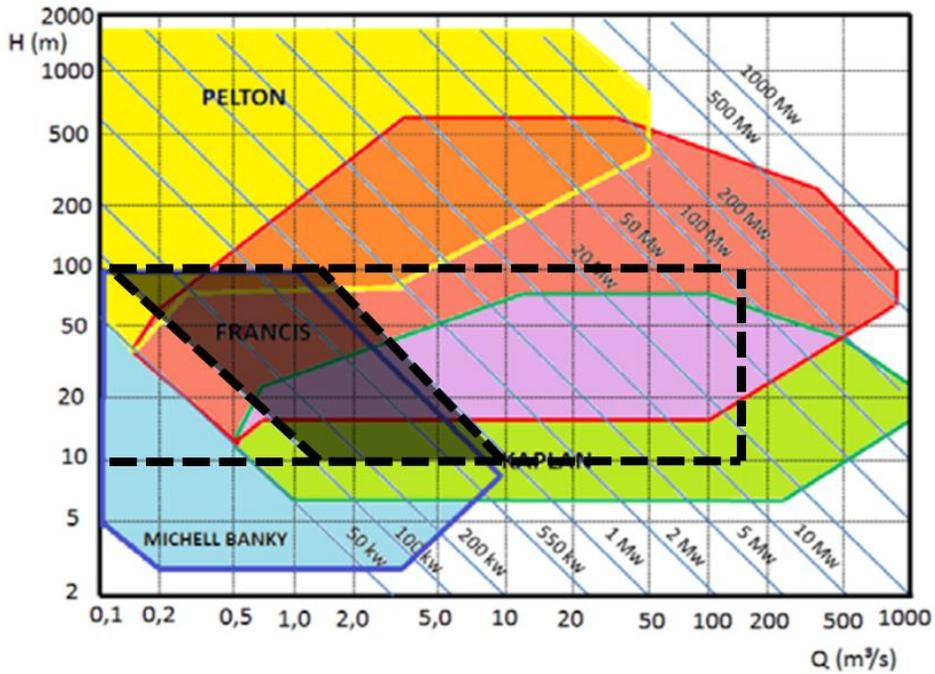


Figura 32. Gráfica para la selección de turbinas, el área sombreada indica la zona con las turbinas que se ajustan a las características de cada sitio.

8 Resultados

8.1 Análisis geoespaciales

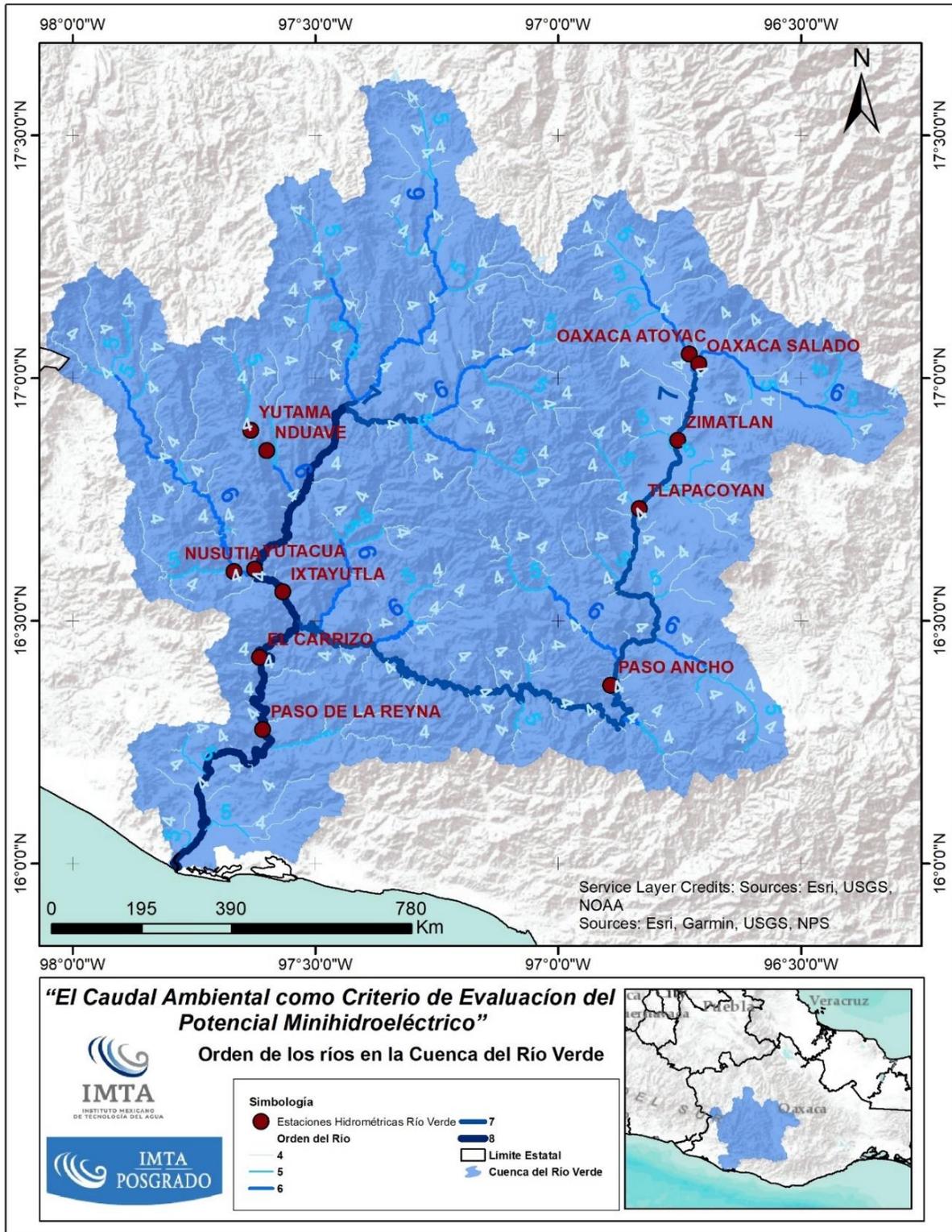
8.1.1 Orden del río Verde

En el caso del río Verde, los datos obtenidos de INEGI y estudios anteriores refieren que alcanza un orden 5 (INEGI, 2022; Rodríguez-Torres, 2012). Sin embargo, el resultado obtenido utilizando modelo digital de elevación de 15 m, indica que el río Verde es de orden 8, con los afluentes del Atoyac y el Alto río Verde de orden 7 y 10 ríos de orden 6: río Salado, río Miahuatlán, río Sola, río Suchíl, río San Pedro, río Minas, río Cuanana, río Yutama, río Putla y río Leche, (Mapa 2).

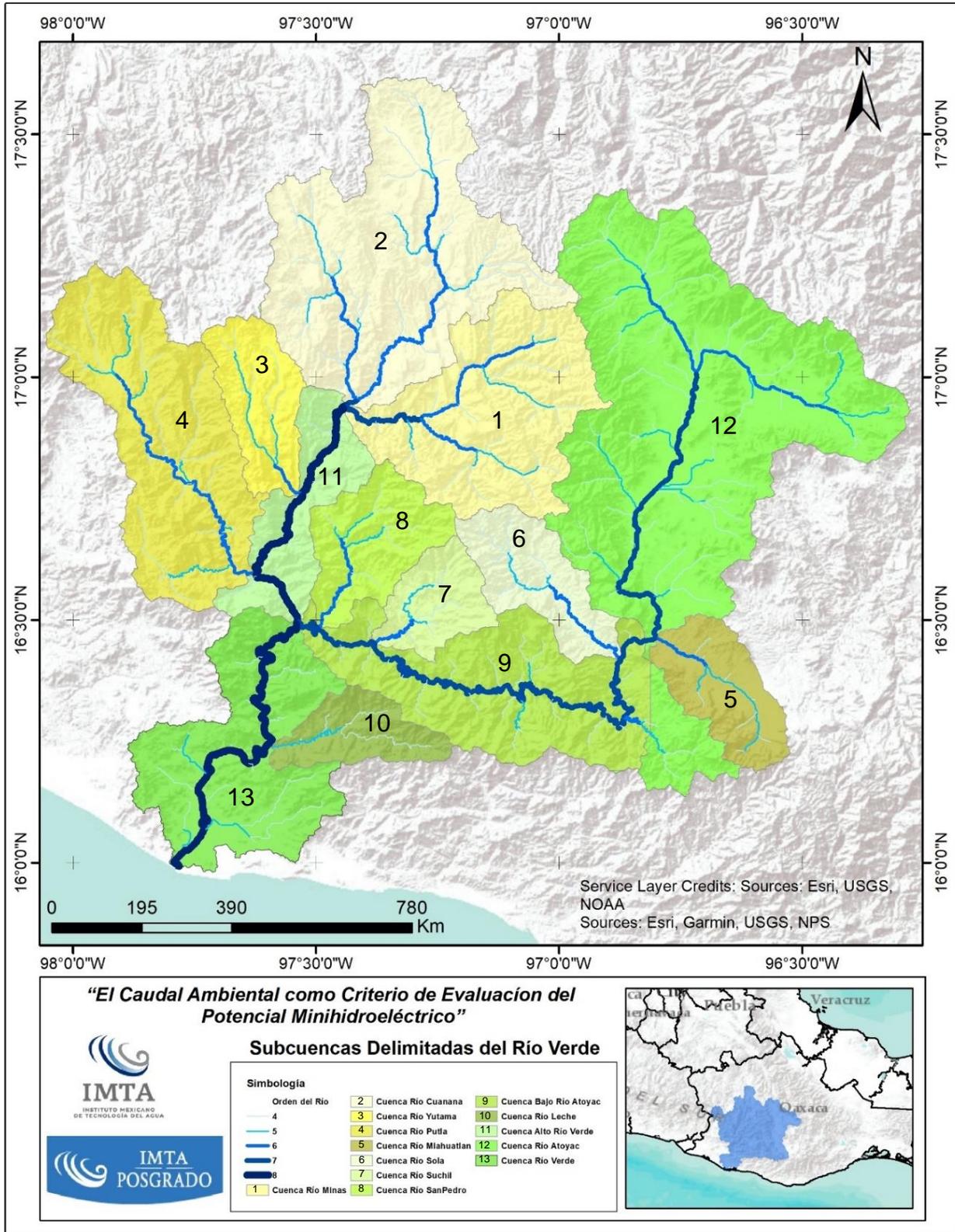
8.1.2 Delimitación de cuencas

Las subcuencas utilizadas en los análisis fueron las descargadas del INEGI (<https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>). Sin embargo, para este trabajo se decidió rediseñar las subcuencas, buscando que coincidieran con los ríos principales (de orden 6 en adelante).

El resultado fueron 13 cuencas, cuatro de ellas dividiendo los ríos Atoyac y Verde en subcuencas altas y bajas, ocho cuencas con ríos de orden seis y otra más con ríos de orden 5. En la vertiente este, perteneciente al río Atoyac se separaron en Alto Atoyac (río Salado), la cuenca del río Miahuatlán, la del río Sola, del río Suchíl y del río San Pedro. En la vertiente oeste, del alto río Verde, las subcuencas se dividieron en río Cuanana, río Minas, río Yutama y río Putla (Mapa 3).



Mapa 2. Orden del río Verde y sus tributarios.



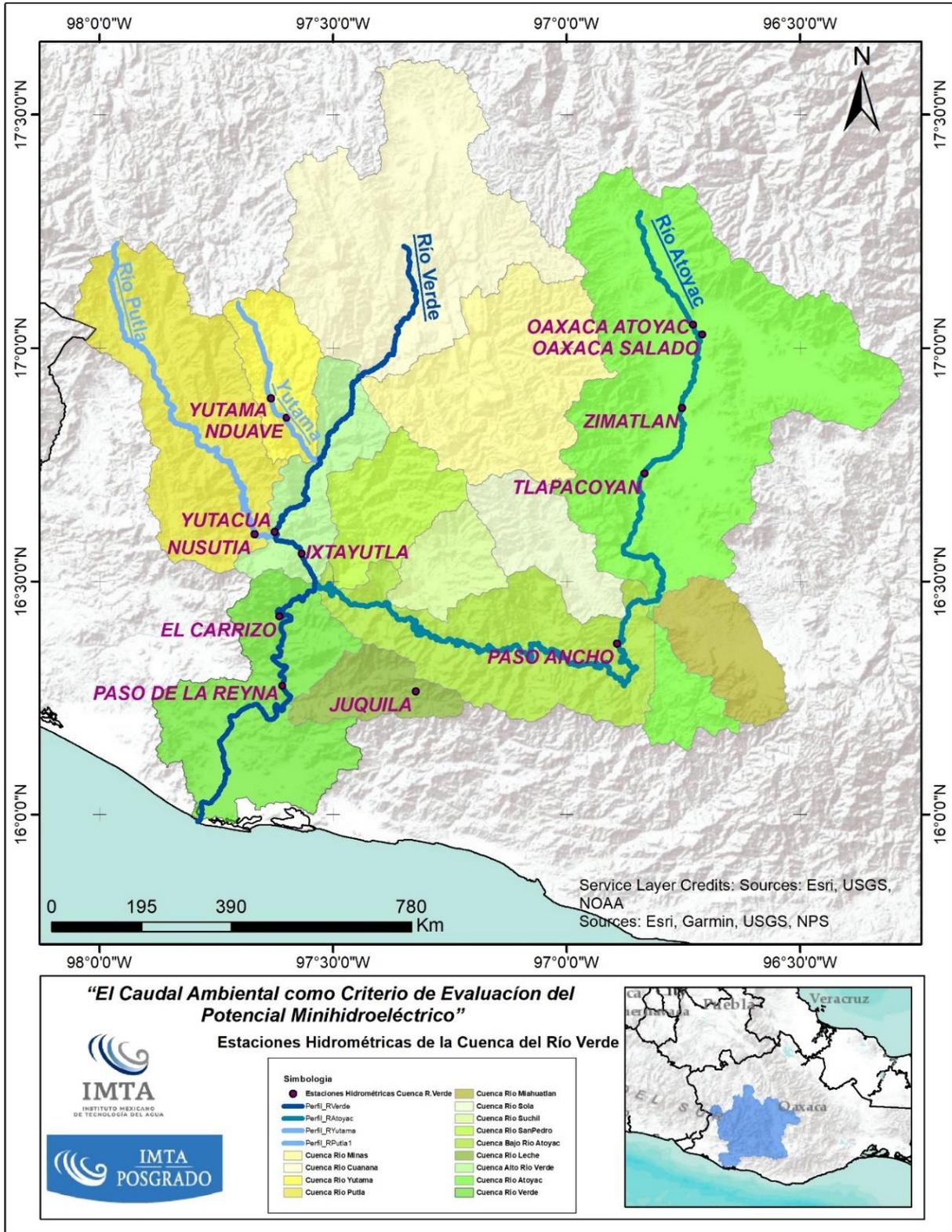
Mapa 3. Subcuencas redefinidas para la cuenca del río Verde.

8.2 Análisis hidrológicos

8.2.1 Estaciones hidrométricas

Dentro de la cuenca del río Verde se identificaron 13 estaciones hidrométricas en la base de datos del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) (Tabla 1). De estas 13 estaciones, nueve tienen más de 20 años de registros, dos de más de 10 años y dos con menos de 10 años. Estas estaciones se encuentran entre los 2,025 y los 49 msnm. Los registros hidrométricos se realizaron entre 1957 y 2015, siendo la estación Paso Ancho la más estudiada ya que cuentan con 49 años de registro (Tabla 1). Existen seis estaciones hidrométricas en la vertiente del río Atoyac, cinco en la vertiente del río Verde y tres más se encuentran después de la confluencia de ambas vertientes (Mapa 4).

Una situación especial se dio en el caso de la estación Juquila, la cual se encontraba en el cauce del río Juquila. Esta estación no fue utilizada en ninguno de los análisis, debido a que solo cuenta con dos años de registros. Aunque se recomienda el uso de más de 20 años de registro para realizar los análisis hidrológicos (The Nature Conservancy, 2011) se decidió incluir a la estación Yutama, la cual cuenta con 9 años, debido a su posición geográfica en la cuenca y sus características topográficas, las cuales podrían resultar útiles en términos de potencial minihidroeléctrico. Finalmente, la estación Ixtayutla presenta 34 años de registros en un periodo de 50 años, los 19 años faltantes corresponden a un periodo continuo entre los años 1991 y 2010, por lo que se decidió utilizar los datos del periodo 1957 a 1990. El resto de las estaciones tienen registros faltantes para cuatro años o menos y no son consecutivos, por lo que también fueron incluidos en los análisis.



Mapa 4. Estaciones hidrométricas de la cuenca del río Verde.

Tabla 2. Estaciones hidrométricas de la cuenca del río Verde. En los años de registro, los años faltantes se muestran entre paréntesis.

Clave	Nombre	Subcuenca	Periodo	Años con Registro (- Faltantes)	Registros Faltantes (*Registros Parciales)	Latitud N	Longitud O	Altitud (msnm)
20005	OAXACA ATOYAC	Coyotepec	1972-1984	12 (-2)	1976-1977	17° 02' 45"	96° 43' 45"	1540
20027	OAXACA SALADO	Coyotepec	1972-1992	20	-	17° 01' 40"	96° 42' 35"	1534
20023	ZIMATLAN	Coyotepec	1972-2002	30 (-4)	1998-2002*	16° 52' 15"	96° 45' 10"	1490
20026	TLAPACOYAN	Atoyac o Alto Verde	1972-2007	35 (-4)	2001, 2003-2006	16° 43' 50"	96° 50' 00"	1460
20036	PASO ANCHO	Atoyac o Alto Verde	1957-2007	50 (-1)	2001	16° 22' 00"	96° 53' 27"	1266
20040	YUTAMA	Yutama	1960-1969	9	Datos Repetidos	16° 53' 30"	97° 38' 00"	2025
20034	NDUAVE	Esmeralda	1954-1967	13	-	16° 02' 55"	97° 36' 00"	1621
20042	YUTACUA	Yalestan	1969-2007	38	-	16° 36' 21"	97° 37' 30"	373
20041	NUSUTIA	Río Putla o de la Cuchara	1969-2007	38	-	16° 36' 03"	97° 40' 05"	380
20021	IXTAYUTLA	Yalestan	1961-2015	54 (-20)	1986, 1992-2010, 2011*	16° 33' 30"	97° 34' 00"	317
20043	EL CARRIZO	Paso de la Reyna	1969-2002	33(-1)	2001	16° 25' 28"	97° 36' 55"	222
20017	PASO DE LA REYNA	Paso de la Reyna	1960-1987	27 (-2)	1986* 1987*	16°.27'50"	97°36' 30"	49
20053	JUQUILA	Atoyac o Bajo Verde	1961-1962	2	-	16° 13' 30"	97° 18' 30"	1397

8.2.2 Perfil longitudinal del río Verde y sus tributarios principales

Utilizando los Modelos Digitales de Elevación y las capas con las características topográficas de los ríos, se realizó el análisis de los perfiles longitudinales de los ríos principales de la cuenca, identificando sus pendientes.

Los ríos presentados son aquellos donde se encuentran las estaciones hidrométricas. En la vertiente este se describe el perfil del río Saldado y el río Atoyac, mientras que de la vertiente oeste se describen los ríos Putla, Yutama y río Verde.

El río Salado tiene su origen alrededor de los 2200 msnm en el municipio de San Lorenzo Albarradas. Tiene una longitud de 66 km, desembocando en el río Atoyac a los 1520 msnm, en la parte sureste de la ciudad de Oaxaca de Juárez (Figura 33)

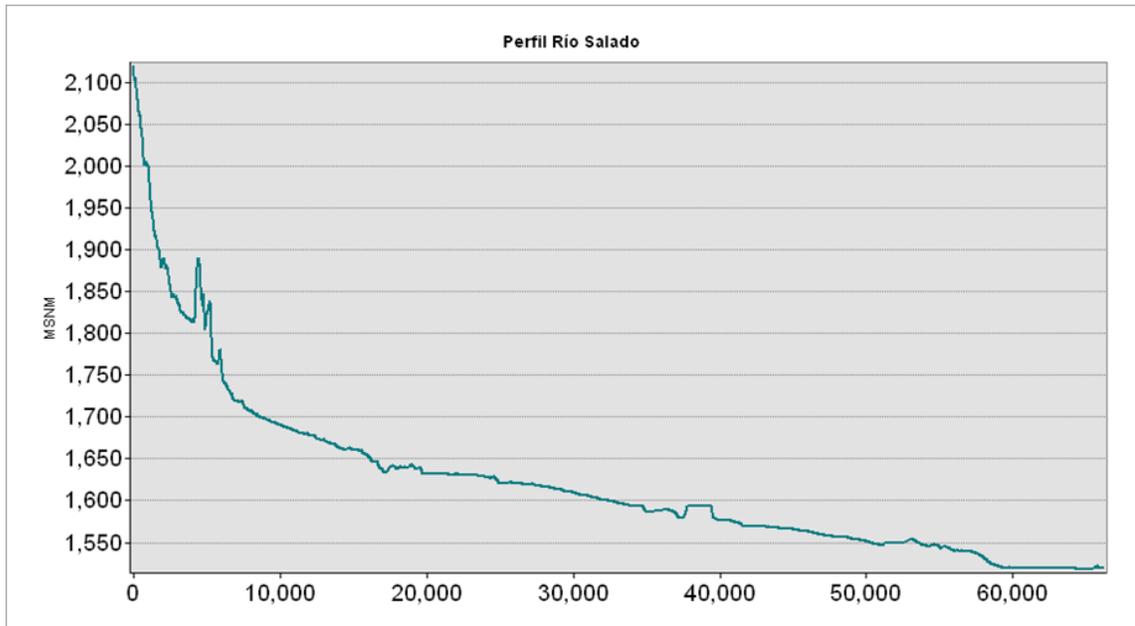


Figura 33. Perfil del río Salado.

El río Atoyac se origina a 2100 msnm, en el municipio de San Francisco Telixtlahuaca desde donde recorre 315 km hasta su desembocadura en el río Verde, a 250 msnm. (Figura 34).

El río Yutama comienza a 2,600 msnm, entre los municipios de la Heroica Ciudad de Tlaxiaco y San Esteban Atlatlahuca, recorre 52 km hasta desembocar en el río Verde a 730 msnm (Figura 35).

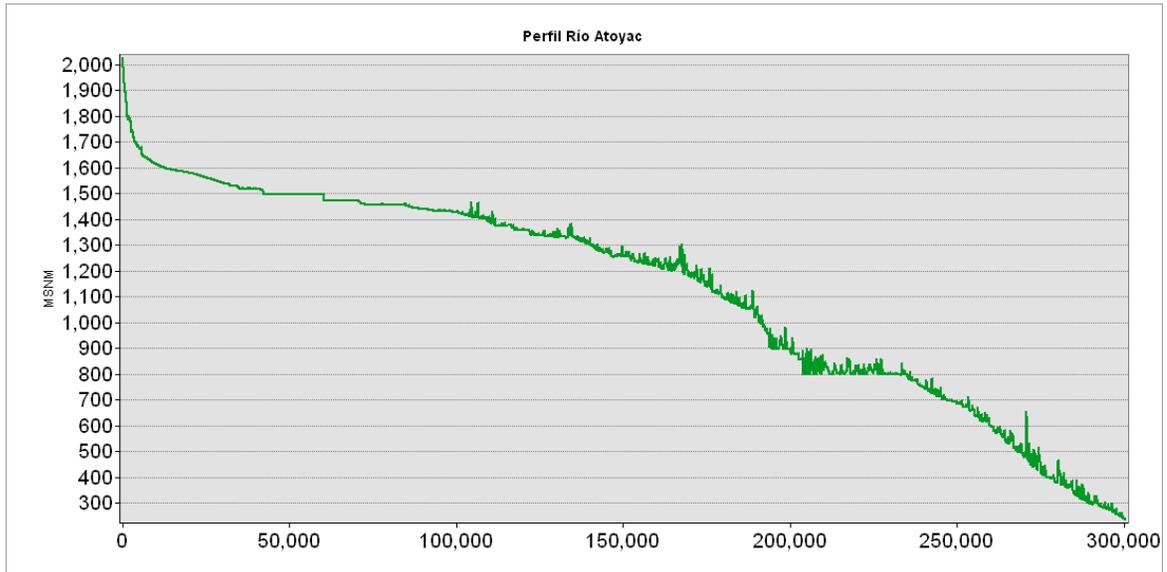


Figura 34. Perfil del río Atoyac.

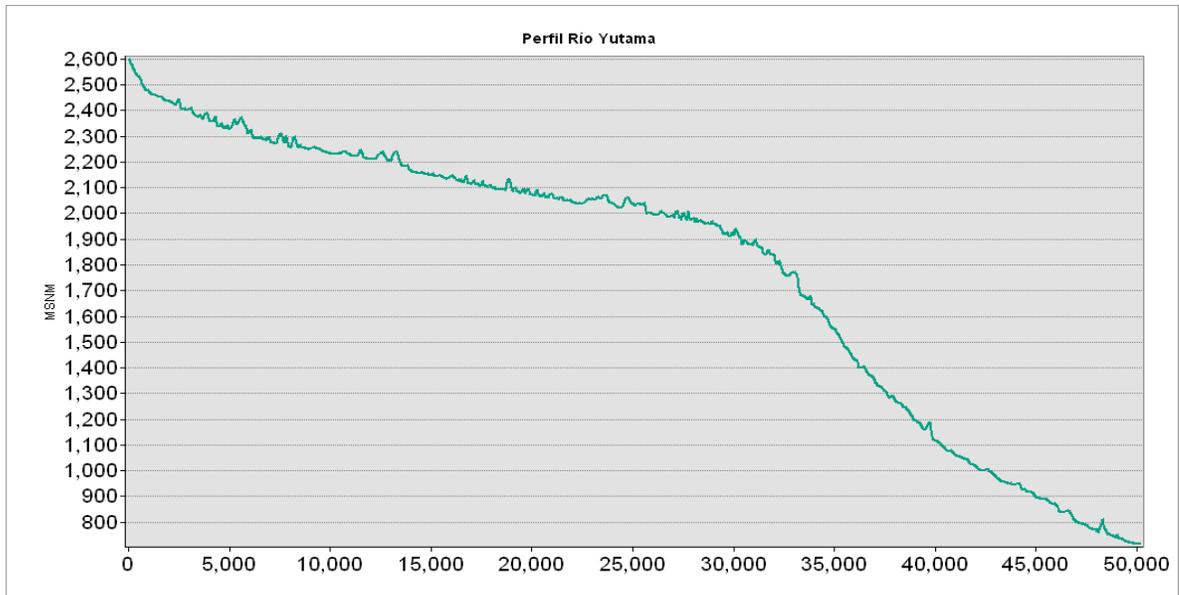


Figura 35. Perfil del río Yutama

El río Putla comienza a los 2400 msnm en el municipio de Santiago Juxtlahuaca y discurre por 119 km hasta su desembocadura en el río Verde, la cual se encuentra a 340 msnm (Figura 36).

Finalmente, el río Verde concentra todos los afluentes de la cuenca, tiene su origen a 2700 msnm, en el municipio de Santo Domingo Tonaltepec, desde donde discurre por 225 km hasta la desembocadura en el océano Pacífico (Figura 37).

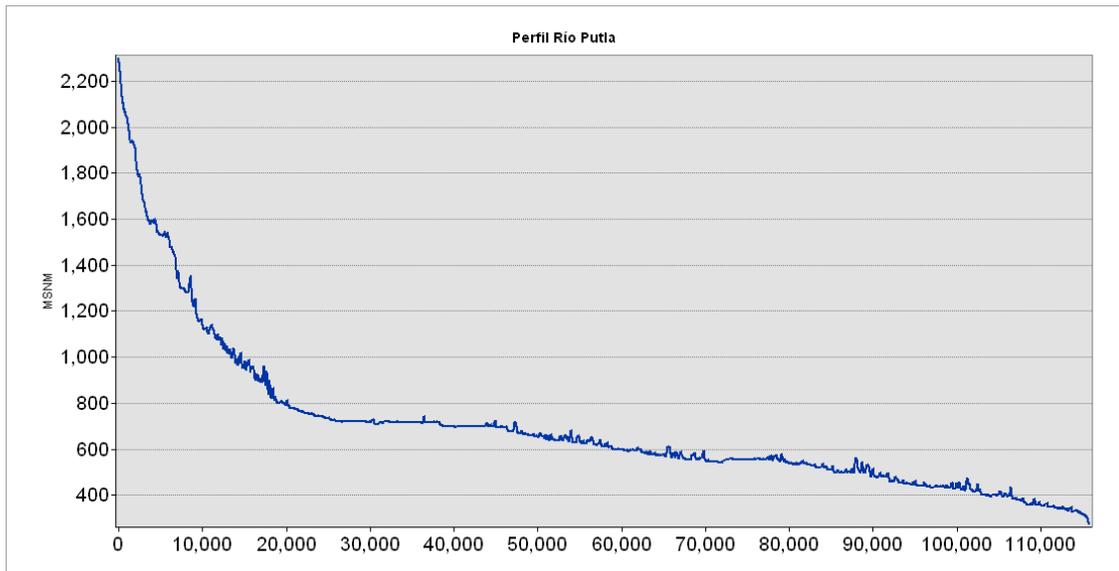


Figura 36. Perfil del río Putla.

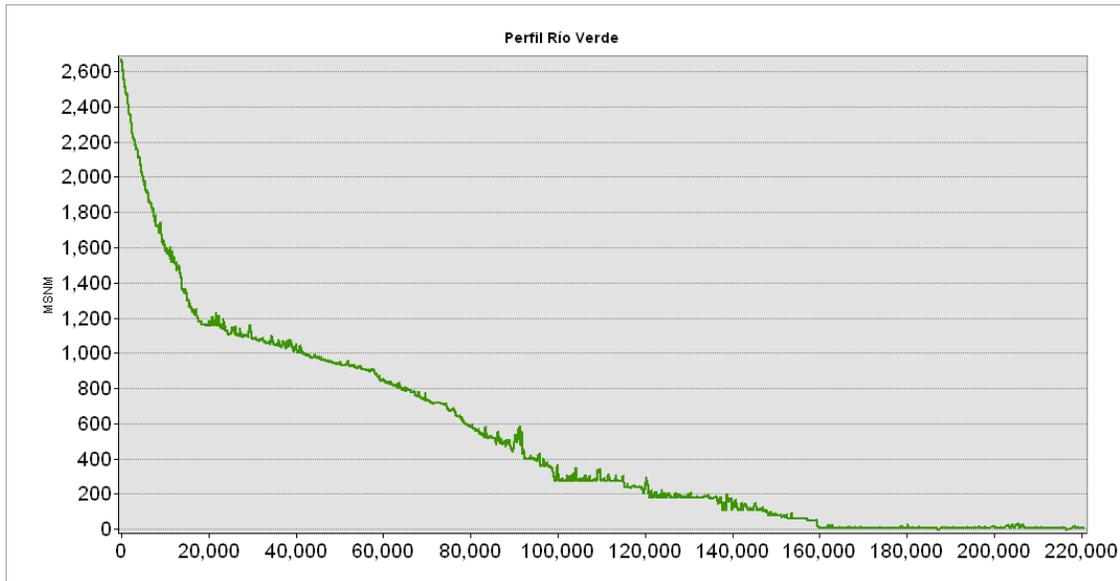


Figura 37. Perfil del río Verde.

8.2.3 Hidrología de la cuenca del río Verde

8.2.3.1 Caudales promedio

Se calculó el caudal anual promedio para cada estación, así como los días de caudal cero, como una manera de comparar las características generales de las estaciones. Los análisis se realizaron en el programa IHA 7.1.

Es posible observar que las estaciones Oaxaca Atoyac, Tlapacoyan, Zimatlán y Oaxaca Salado son las que concentran el mayor número de días con caudal cero. Por otra parte, el caudal promedio nos indica de manera general la cantidad de agua que puede estar disponible para generación (Figura 38).

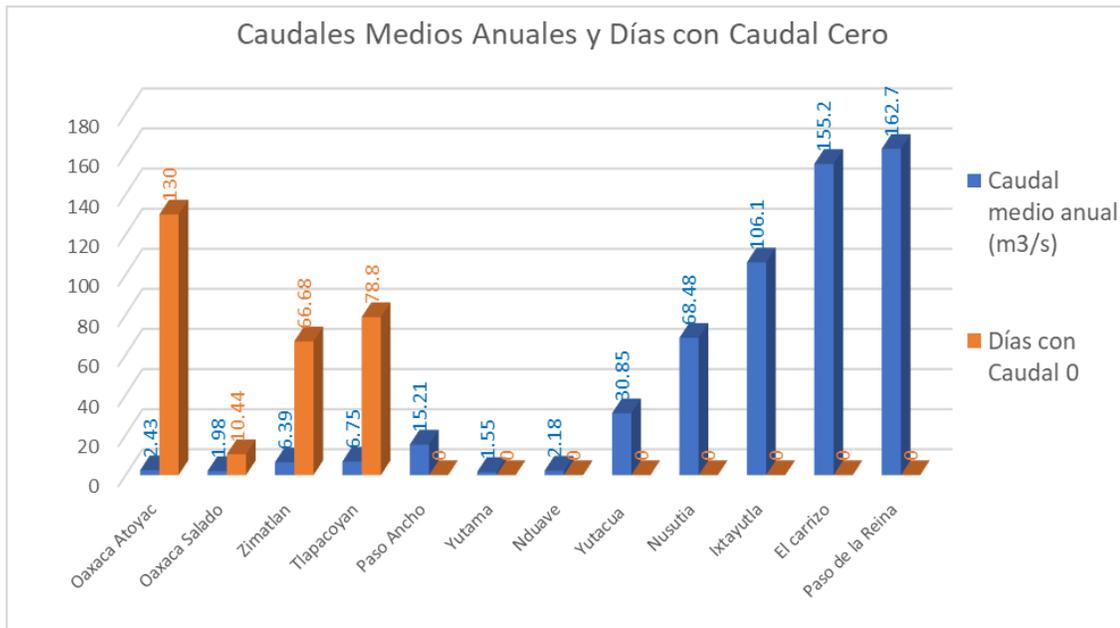


Figura 38. Caudales medios y días con caudal cero de las estaciones hidrométricas de la cuenca del río Verde.

8.2.3.2 Estaciones con caudal cero

Entre los resultados hidrológicos obtenidos se identificaron cuatro estaciones hidrométricas con periodos largos de caudal cero. Las estaciones Oaxaca Atoyac, Oaxaca Salado, Zimatlán y Tlapacoyan presentaron al menos 10 días al año de caudal cero y algunos años llegaron a tener más de 200 días de caudal cero, especialmente Oaxaca Atoyac, Zimatlán y Tlapacoyan (Figura 39). Estas estaciones se encuentran en la parte alta del río Atoyac, correspondiente a la vertiente este de la cuenca del río Verde y fueron excluidas del resto de los análisis debido a que presentan periodos con caudales cero prolongados. Además de que los caudales promedio anuales oscilan entre los 1.98 m³/s para Oaxaca Salado y 6.75 m³/s en la estación Tlapacoyan.

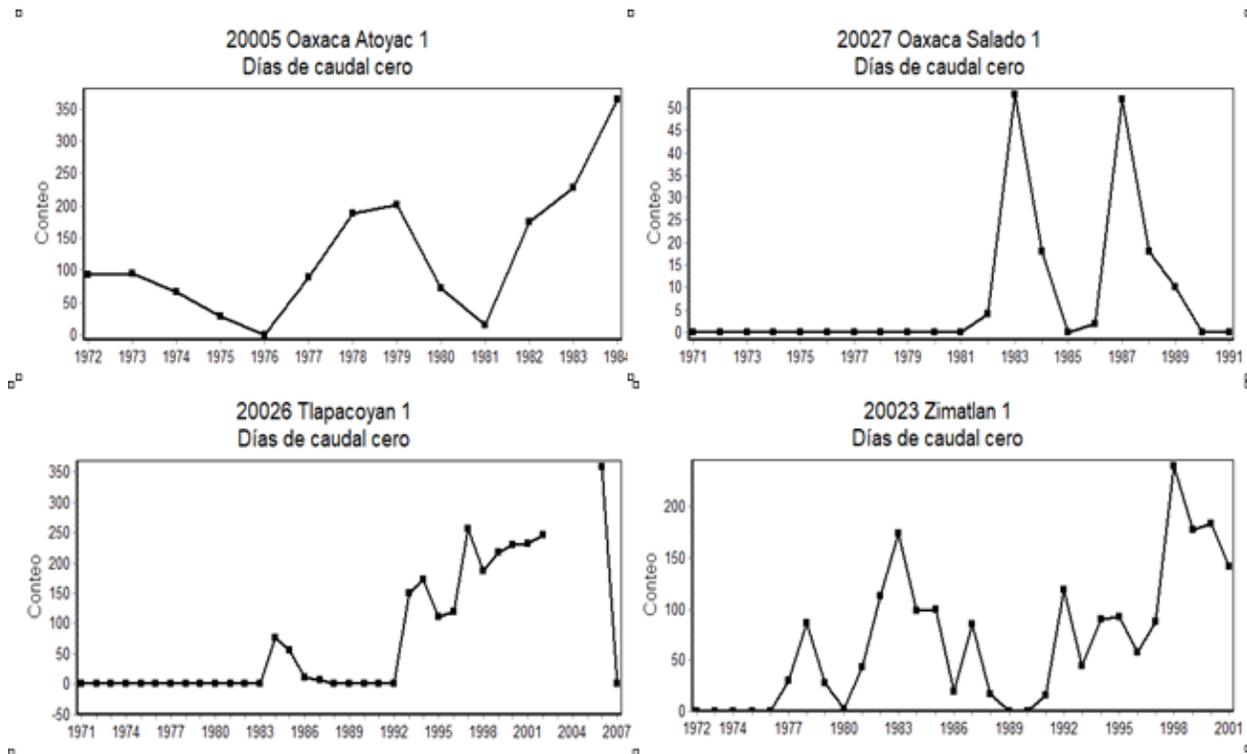


Figura 39. Estaciones con caudales cero de la cuenca del río Verde.

8.2.3.3 Caudales pico

La tabla 2 muestra los resultados generales de los caudales promedio y los picos altos y bajos obtenidos de los datos históricos. Resaltan las diferencias de caudal promedio entre las estaciones Yutama y Nduave respecto al resto de las estaciones de la vertiente oeste. Esta diferencia también resulta evidente para estas dos estaciones al observar los años de registro, donde todas las estaciones tienen al menos 27 años, mientras que Yutama y Nduave solo 9 y 13 respectivamente. Es importante resaltar que según el manual de alteraciones hidrológicas es necesario tener al menos 20 años de registro para que los análisis puedan ser confiables.

Tabla 3. Caudales promedio y caudales pico altos y bajos a partir de los datos históricos.

Estación	Años de registro	Caudal Anual Promedio (m ³ /s)	Caudal Pico Alto (m ³ /s)	Caudal Pico Bajo (m ³ /s)
Oaxaca Atoyac	13	2.43	267	0.001 (0)
Oaxaca Salado	20	1.98	200	0.002 (0)
Zimatlán	26	6.39	498	0.001 (0)
Tlapacoyan	35	6.75	290	0.001 (0)
Paso Ancho	52	15	829	0.83
Yutama	9	1.55	85	0.15
Nduave	13	2.18	54	0.5
Yutacua	38	30.85	713	2.9
Nusutia	38	68	1178	1.6
Ixtayutla	32	106	1581	8.7
El Carrizo	33	155	5730	10.6
Paso de la Reina	27	162.7	4982	7.6

8.3 Resultados por estación hidrométrica ¹

8.3.1 Estación hidrométrica Juquila.

La estación hidrométrica Juquila se encuentra dentro de la cuenca del río Leche, corresponde al número 20053 en la base de datos Bandas y a una altitud de 1,397 msnm. Esta estación fue la primera en ser descartada de los análisis debido a que solo posee dos años de registros hidrológicos.

8.3.2 Estación hidrométrica Oaxaca Atoyac.

La estación hidrométrica se encuentra en la parte noreste de la cuenca del río Verde, en la subcuenca del Alto río Atoyac. En el registro del BANDAS esta estación

¹ Las estaciones Oaxaca Atoyac, Oaxaca Salado, Tlapacoyan y Zimatlán fueron analizadas hasta la curva de duración de caudales. Las estaciones Yutama y Nduave se analizaron hasta la curva de duración de caudales restando los caudales bajos mensuales a los caudales diarios promedio. Las características por las que estas estaciones fueron descartadas para los análisis sucesivos se describen con mayor detalle en la discusión de este trabajo.

corresponde al número 20005 y se ubica dentro de la zona urbana de la ciudad de Oaxaca de Juárez (Mapa 4) a una altitud de 1,540 msnm (Figura 40). En este tramo el río Atoyac es de orden seis (Mapa 2), cuenta con 10 años de registros hidrométricos (1972-1975 y 1977-1984) y con excepción de 1976 se reportaron entre 10 a 240 días de caudal cero, con un máximo histórico de 350 días con caudal cero en el año 1984 (Figura 41) y posee un caudal medio anual de 2.43 m³/s (Figura 38).

La curva de duración de caudales muestra que la estación Oaxaca Atoyac posee una probabilidad de 66% de tener caudales mayores a 0.001 m³/s, con probabilidad de superar caudales de 0.1 m³/s por debajo de 50%, y una probabilidad menor al 10% de superar 1 m³/s (Tabla 3, Figura 42).

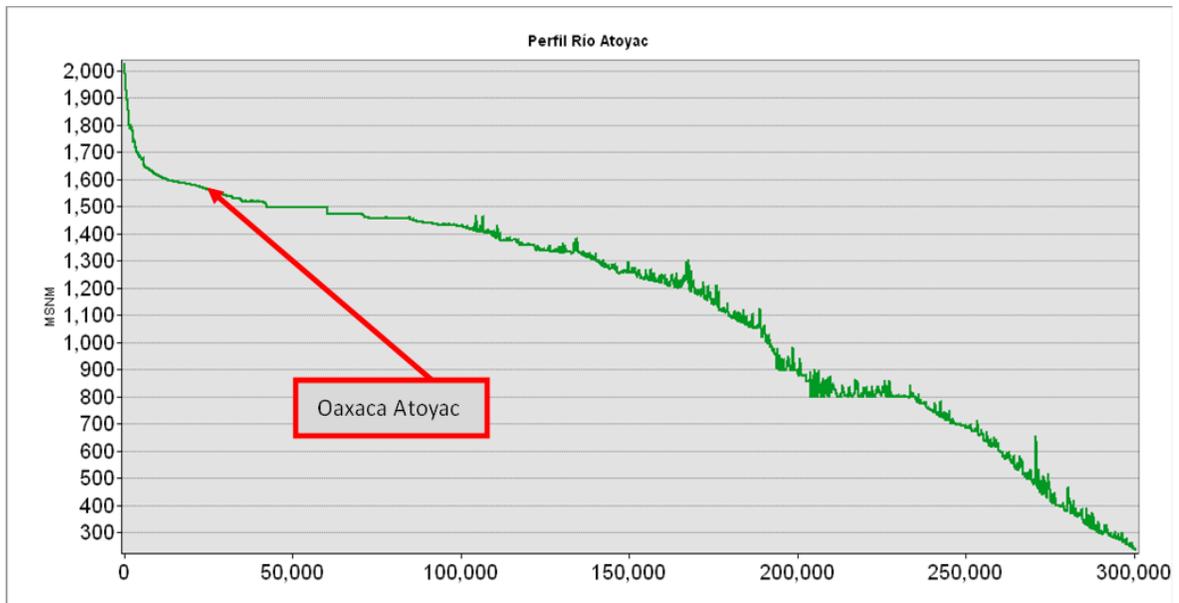


Figura 40. Localización de la estación Oaxaca Atoyac en el perfil del río Atoyac.

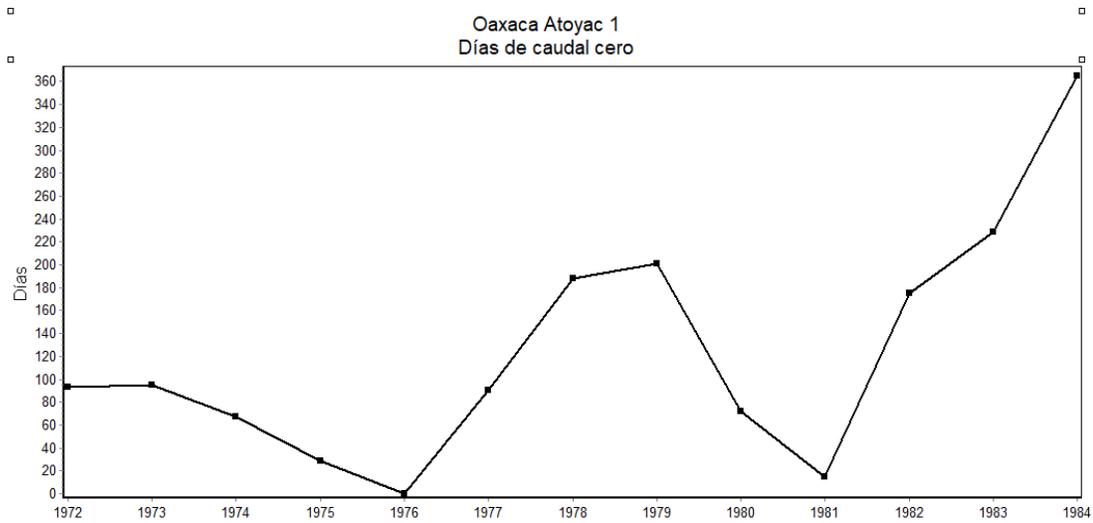


Figura 41. Días de caudal 0 para la estación Oaxaca Atoyac.

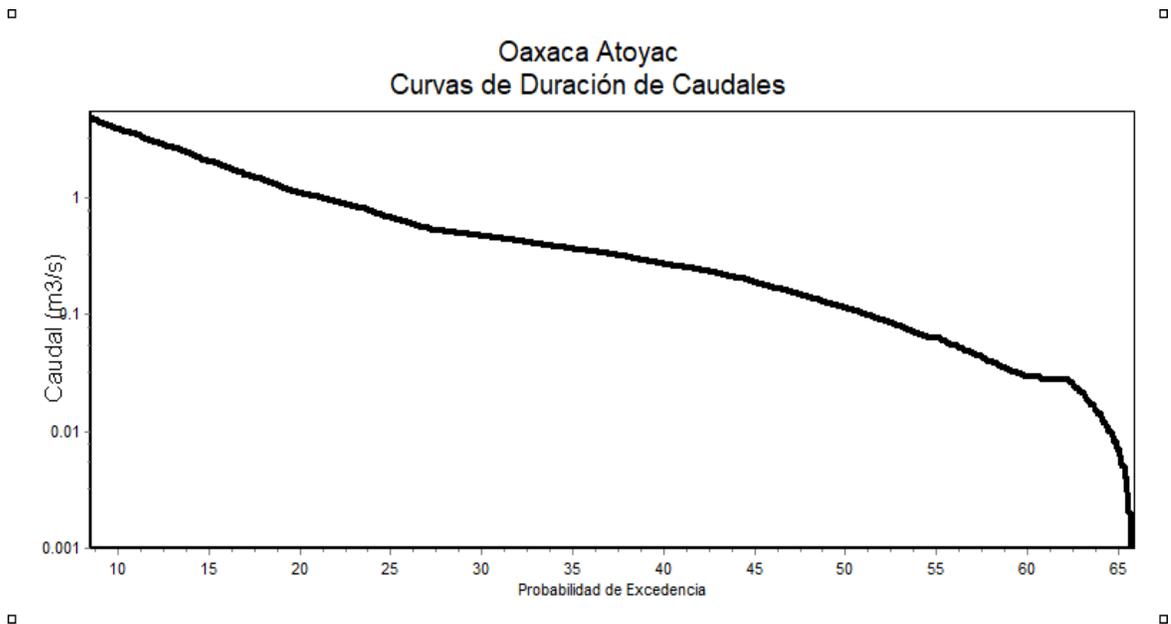


Figura 42. Curva de duración de caudales de la estación Oaxaca Atoyac.

8.3.3 Estación hidrométrica Oaxaca Salado

Esta estación hidrométrica se encuentra en el río Salado que es de orden seis, 1,500 m aguas arriba de la confluencia entre este río y el río Atoyac, en el BANDAS se identifica con la clave 20002 (Mapa 2). Al igual que la estación Oaxaca Atoyac, se

encuentra dentro del área urbana de la ciudad de Oaxaca de Juárez a 1,534 msnm (Figura 43) y posee 20 años de mediciones ininterrumpidas (1972-1992). La estación reporta dos años con más 50 días de caudal cero (1983 y 1987), mientras que en los periodos entre 1971 a 1981 y 1990 a 1992 no reportó días con caudal cero, así como en el año 1985 (Figura 44) y presenta un caudal medio anual de 1.98 m³/s (Tabla 3, Figura 38).

La curva de duración de caudales de la estación Oaxaca Salado muestra que la probabilidad de superar 0.05 m³/s es de 95%, mientras que los caudales mayores a 1 m³/s solo tienen 15% de probabilidad de ocurrencia (Figura 45).

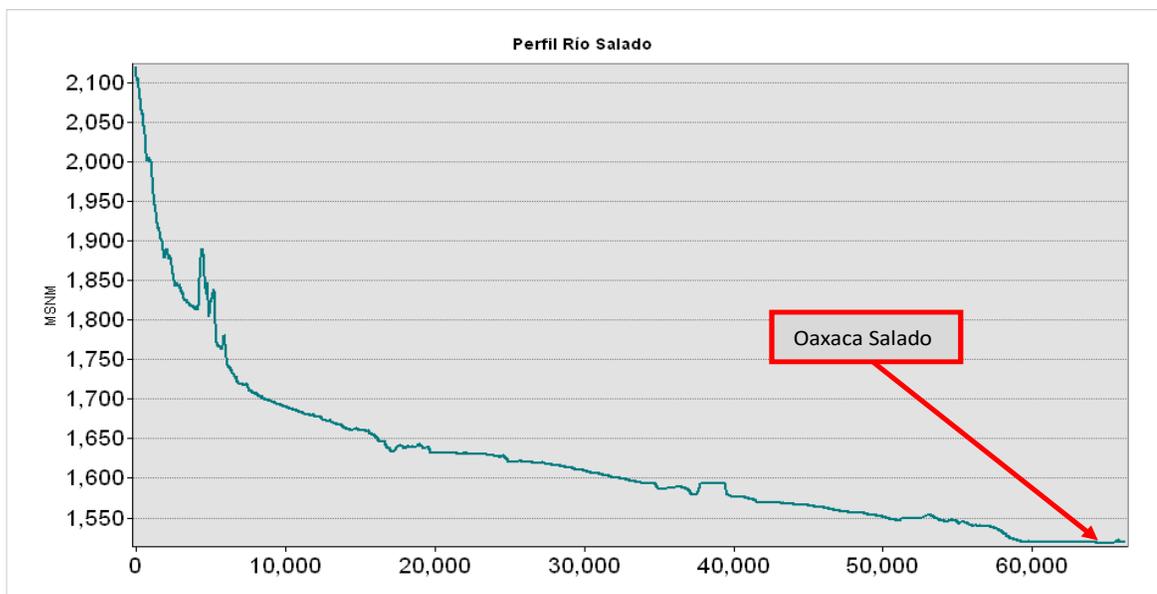


Figura 43. Localización de la estación Oaxaca Salado en el perfil del río Salado.

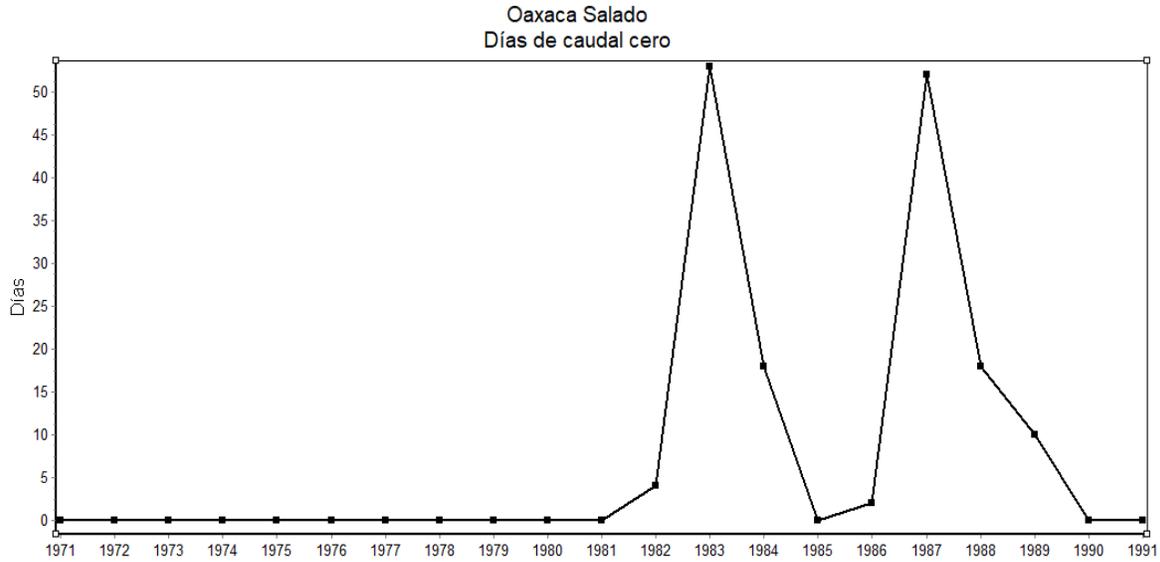


Figura 44. Días de caudal 0 en la estación Oaxaca Salado.

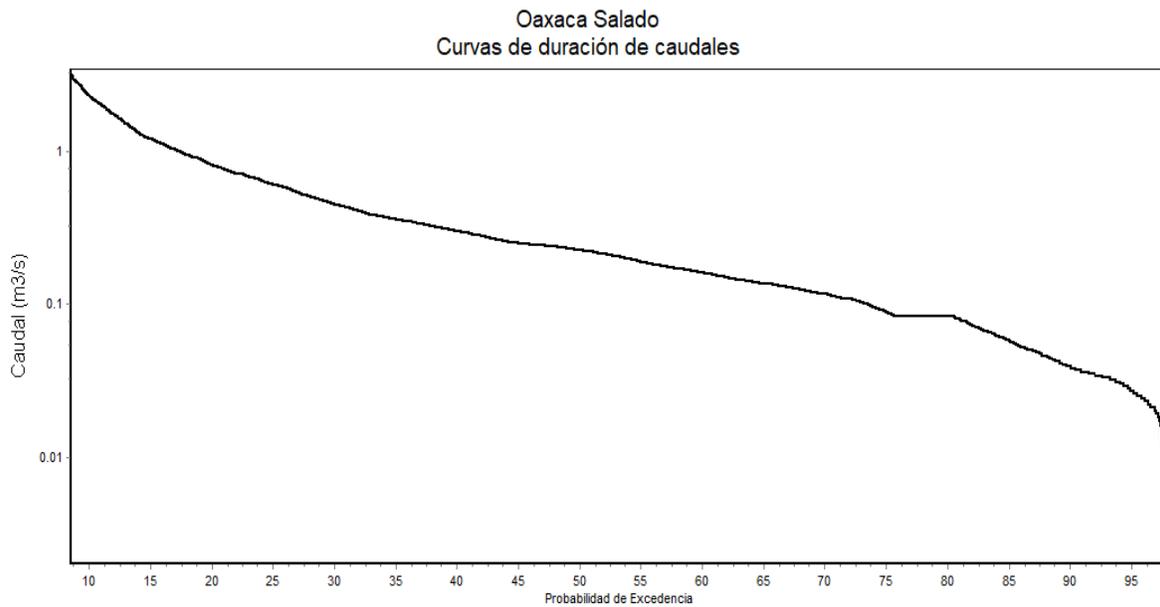


Figura 45. Curva de duración de caudales de la estación Oaxaca Salado.

8.3.4 Estación hidrométrica Zimatlán

La estación hidrométrica se encuentra en el río Atoyac, que tiene un valor de orden siete (Mapa 2), alrededor de 20 km aguas abajo de la estación El Salado. En la base de datos del BANDAS tiene la clave 20023. Se encuentra en la cuenca alta del río Atoyac a 1,490 msnm (Figura 46) y tiene registros de 26 años, con registros parciales o incompletos entre 1998 a 2002. Esta estación reporta hasta 250 días de caudal cero, correspondiente a 1998 y al menos 10 días de caudal cero para 22 de los 26 años medidos (Figura 47), tiene un caudal anual promedio de 6.39 m³/s (tabla 3, Figura 38).

La curva de duración de caudales de la estación Zimatlán muestra que la probabilidad de exceder un caudal de 0.01 m³/s es del 80%, mientras que la probabilidad de superar 1 m³/s es del 50% y superar los 10 m³/s solo tienen un 10% de probabilidad de ocurrencia (Figura 48).

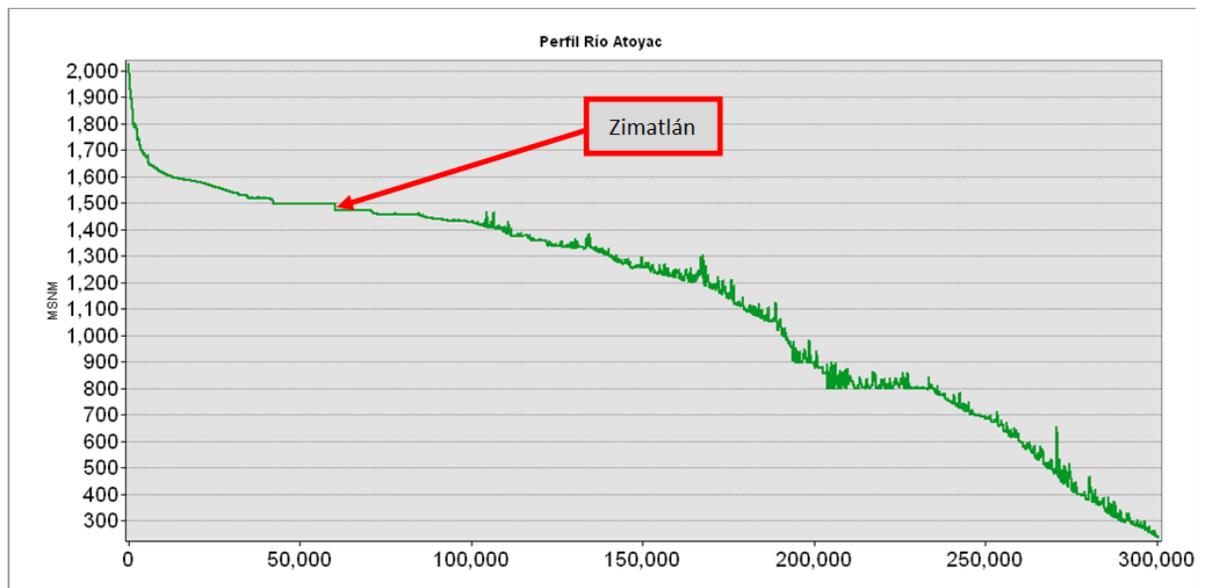


Figura 46. Localización de la estación Zimatlán en el perfil del río Atoyac.

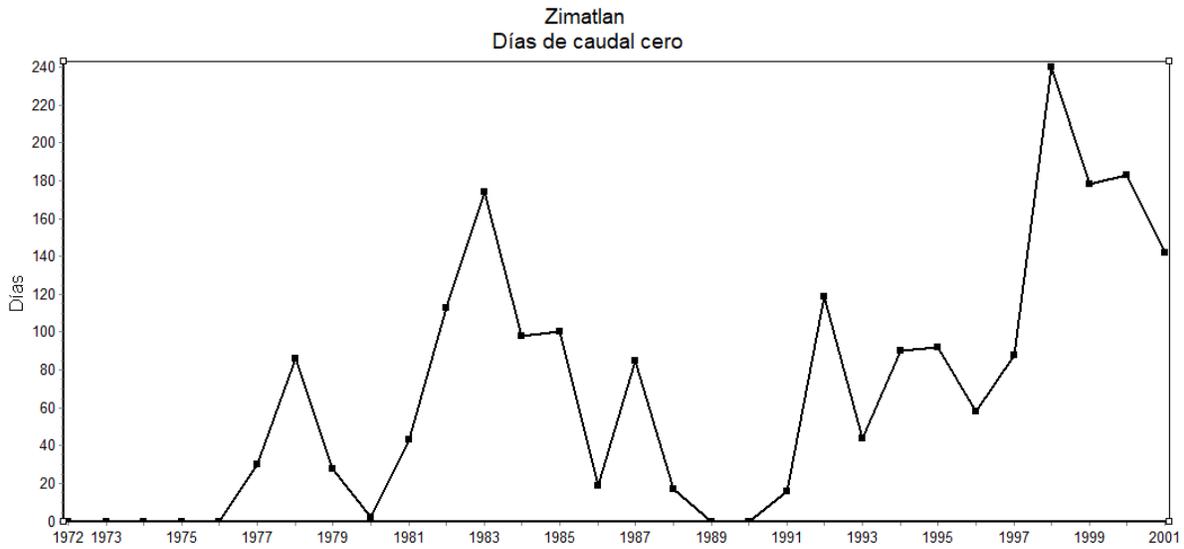


Figura 47. Días de caudal 0 en la estación Zimatlán.

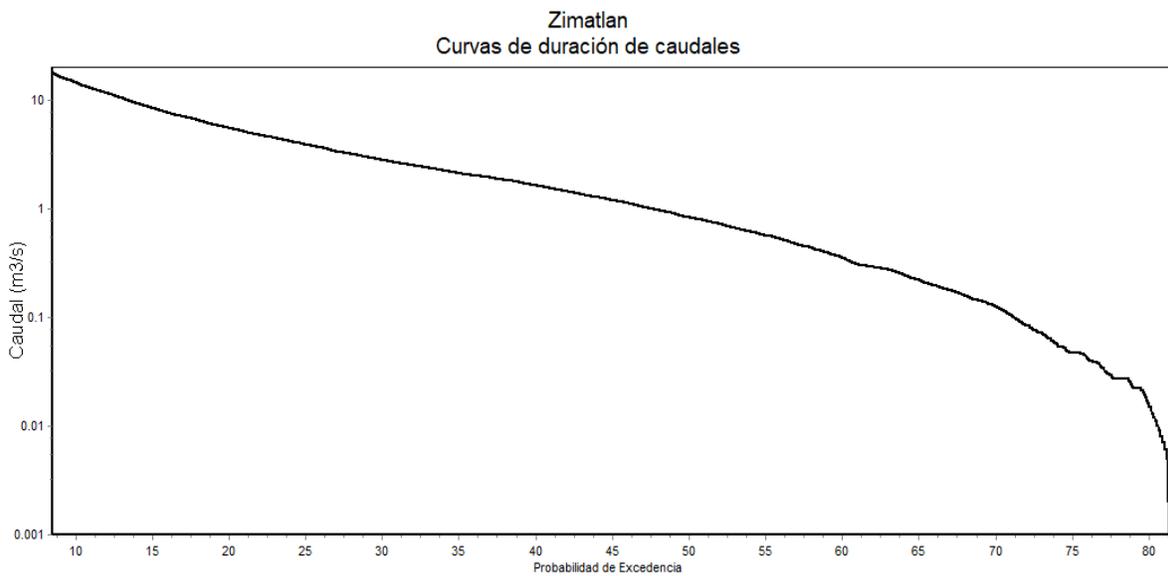


Figura 48. Curva de duración de caudales estación Zimatlán.

8.3.5 Estación hidrométrica Tlapacoyan.

La estación Tlapacoyan se encuentra en la cuenca alta del río Atoyac, el cual es un río de orden siete (Mapa 2), 22 km aguas abajo que la estación Zimatlán a una altitud de

1,460 msnm (Figura 49). En la base de datos BANDAS tiene el número 20026 y posee registros de 35 años, entre 1972 y 2007, con las excepciones de los años 2001 y el periodo 2003-2006 (Tabla 2). Muestra un máximo 360 días con caudal cero. Sin embargo, en el periodo entre 1971 y 1992 solo se presentaron tres años con días con caudal cero, pero a partir de 1992 y hasta 2003, todos los años posee al menos 100 días de caudal cero (Figura 50). Tiene un caudal anual promedio de 6.75 m³/s (Tabla 3, Figura 38).

La curva de duración de caudales de la estación Tlapacoyan muestra una probabilidad de excedencia para 0.01 m³/s es de 80%, mientras que la probabilidad para 1 m³/s es de 40% y de solo 15% para 10 m³/s (Figura 51).

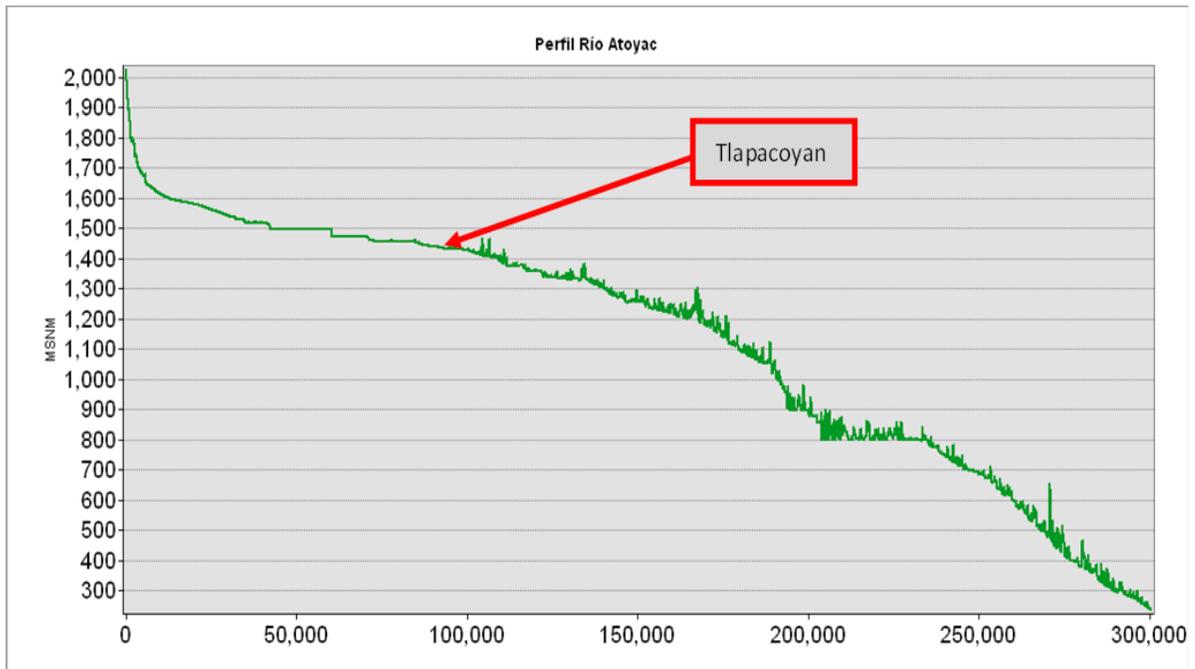


Figura 49. Localización de la estación Tlapacoyan en el perfil del río Atoyac.

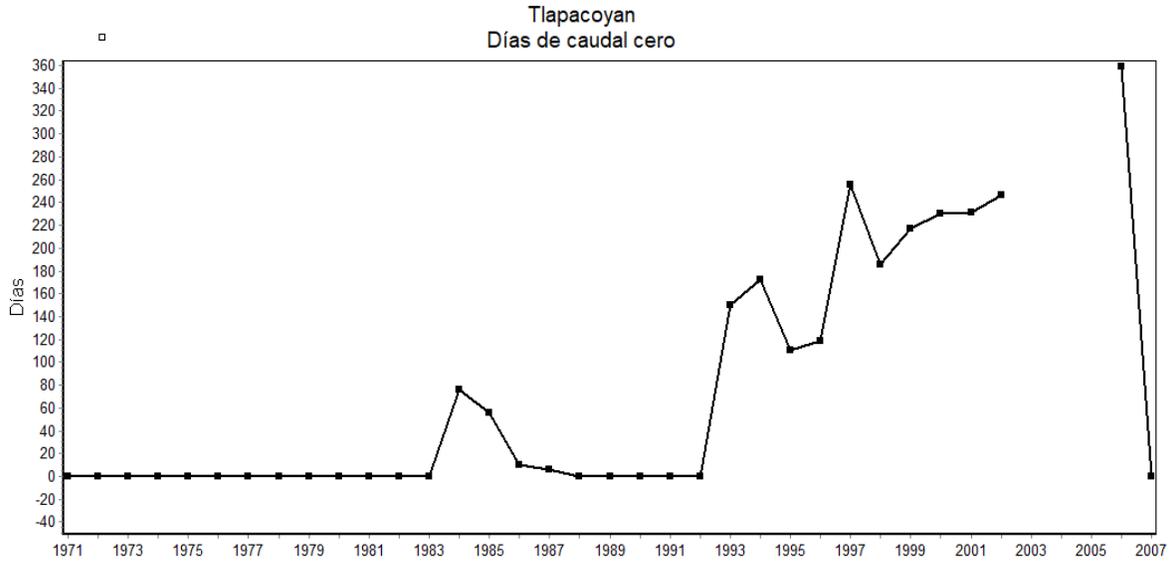


Figura 50. Días de caudal 0 en la estación Tlapacoyan.

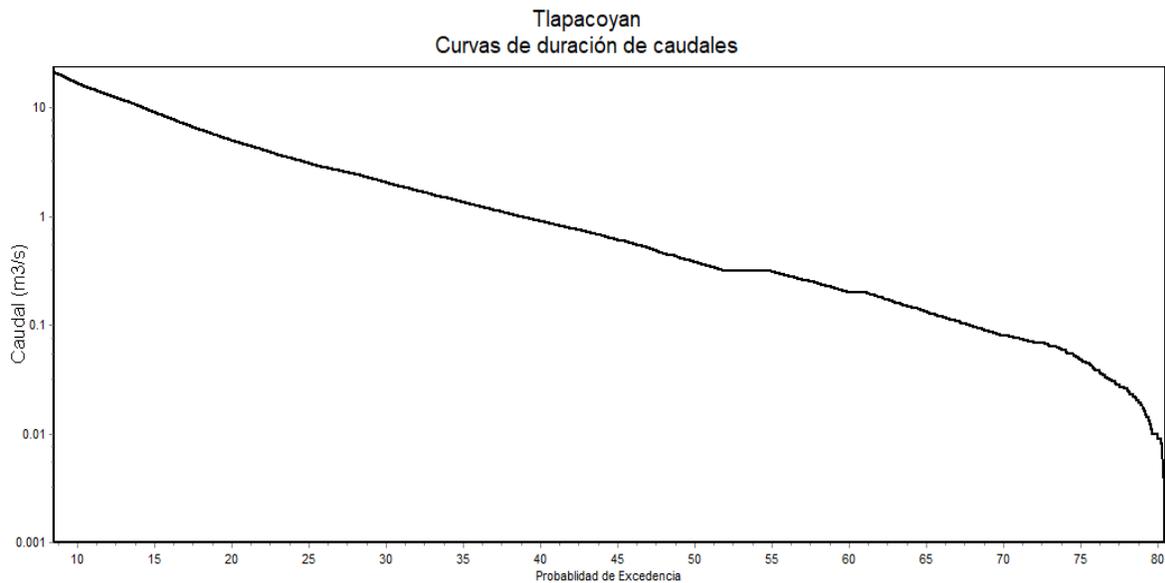


Figura 51. Curva de duración de caudales de la estación Tlapacoyan.

8.3.6 Estación hidrométrica Yutama.

La estación Yutama se encuentra sobre el río Yutama, en la subcuenca del mismo nombre, es de orden 5 (Mapa 2) y se encuentra al noroeste de la cuenca del río Verde, en la base de datos BANDAS tiene el número 20040. Es la estación hidrométrica con mayor altitud de la cuenca, ya que se encuentra a 2, 025 msnm (Figura 52). Cuenta con registros de 9 años, de 1960-1969, lo que la hace la segunda estación con menos años de registro (Tabla 2). Por otra parte, los datos hidrométricos muestran que la estación no tiene registros con caudal cero y el caudal promedio anual es de 1.55 m³/s (Tabla 3, Figura 38).

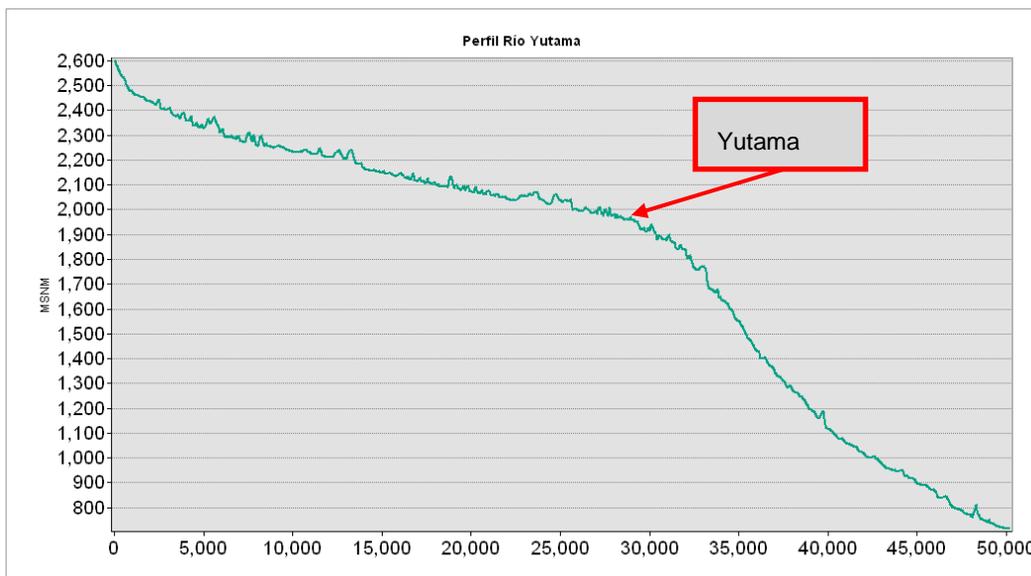


Figura 52. Perfil del río Yutama y localización de la estación Yutama.

La curva de duración de caudales de la estación Yutama muestra que tiene 95% probabilidad de alcanzar o exceder 0.3 m³/s, tiene 50% de probabilidad para un caudal de 0.5 m³/s, 35% de probabilidad para 1 m³/s y de 10% para 3 m³/s. (Figura 53).

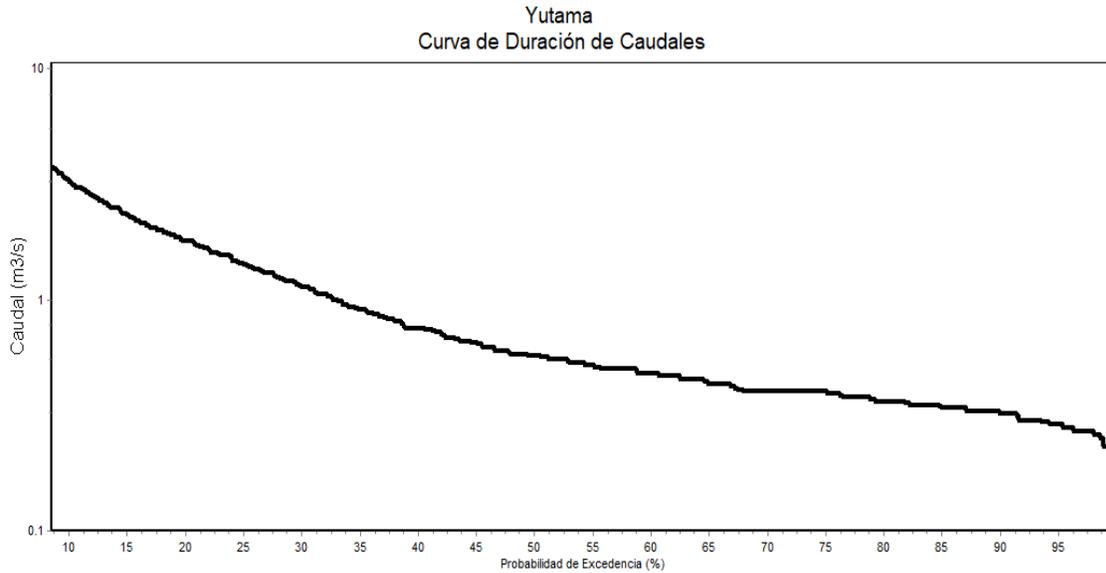


Figura 53. Curva de duración de caudales de la estación Yutama.

Los caudales extremadamente bajos tienen tres componentes diferentes: el caudal de pico mínimo, la duración en días y la frecuencia con la que ocurren para cada año, la estación Yutama es la estación con menor caudal medio anual de toda la vertiente oeste de cuenca del río Verde con 1.55 m³/s (Figura 38). Los caudales extremadamente bajos registrados oscilan entre los 0.25 y 0.32 m³/s, la duración de los caudales extremadamente bajos es de entre 2 y 22 días y ocurre entre 2 a 9 veces al año (Figura 54).

Por su parte, los caudales diarios promedio muestran un valor mínimo de 0.28 m³/s y un máximo de 11.96 m³/s. Desde el inicio de junio hasta principios de noviembre los caudales supera 1 m³/s y solo un día a finales de noviembre que en promedio supera 10 m³/s. Entre noviembre y principios de junio los caudales nunca superan 1 m³/s (Figura 55).

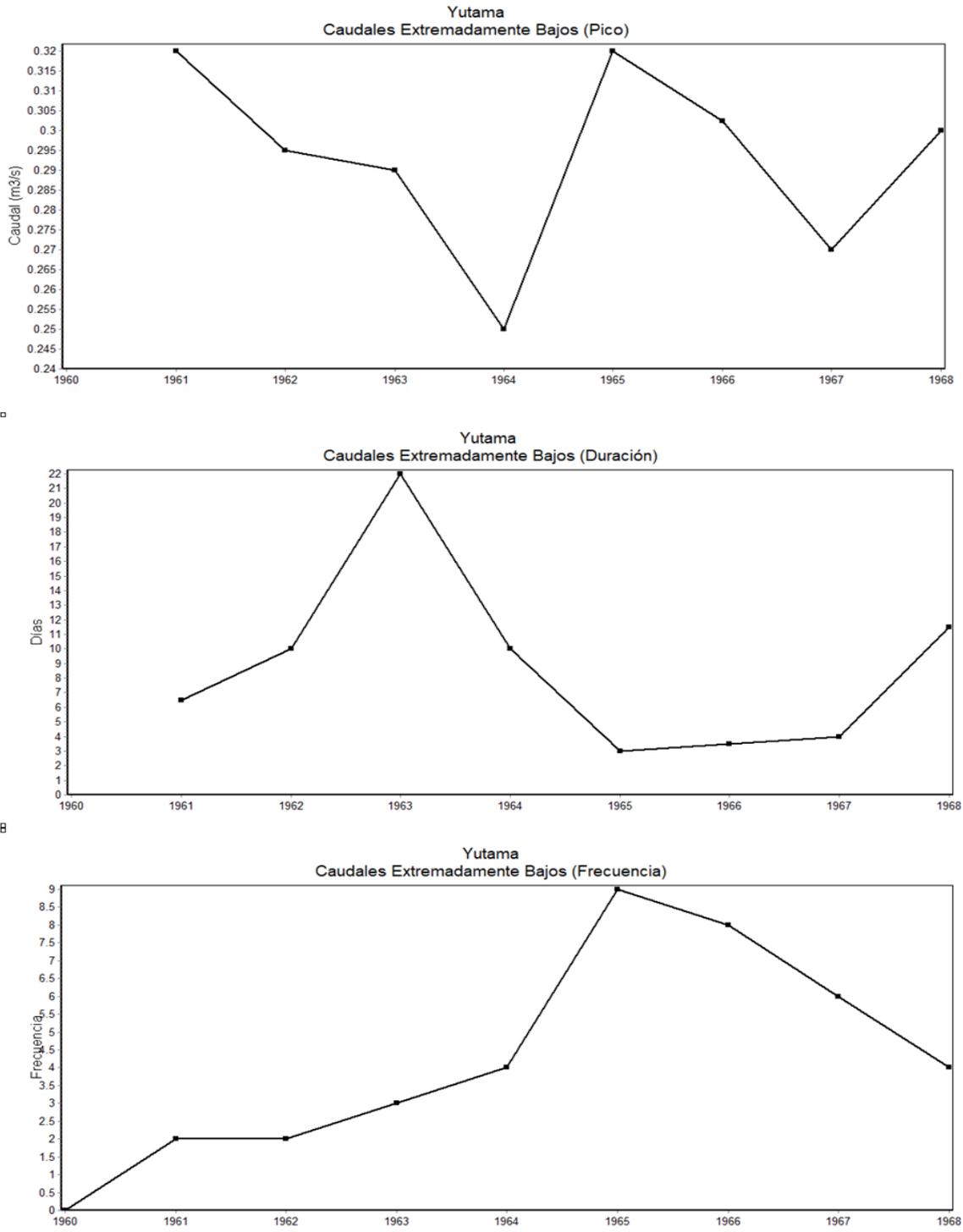


Figura 54 Caudales extremadamente bajos en la estación Yutama. Gráficas de caudal extremadamente bajo, duración y frecuencia.

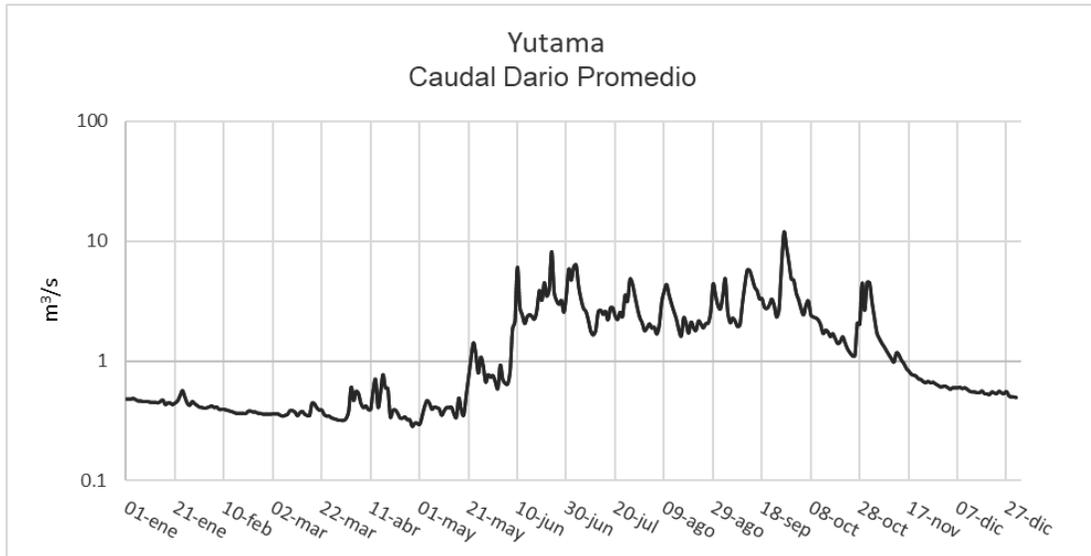


Figura 55. Logaritmo del caudal diario promedio de la estación Yutama.

Los caudales bajos mensuales (CBM) alcanzan valores de entre 0.35 a 1.18 m³/s. Entre los meses de enero y mayo estos caudales son menores a 0.4 m³/s, mientras que en los meses de junio a diciembre son superiores a los 0.5 m³/s, con los meses de agosto a octubre de 1 m³/s (Figura 56).

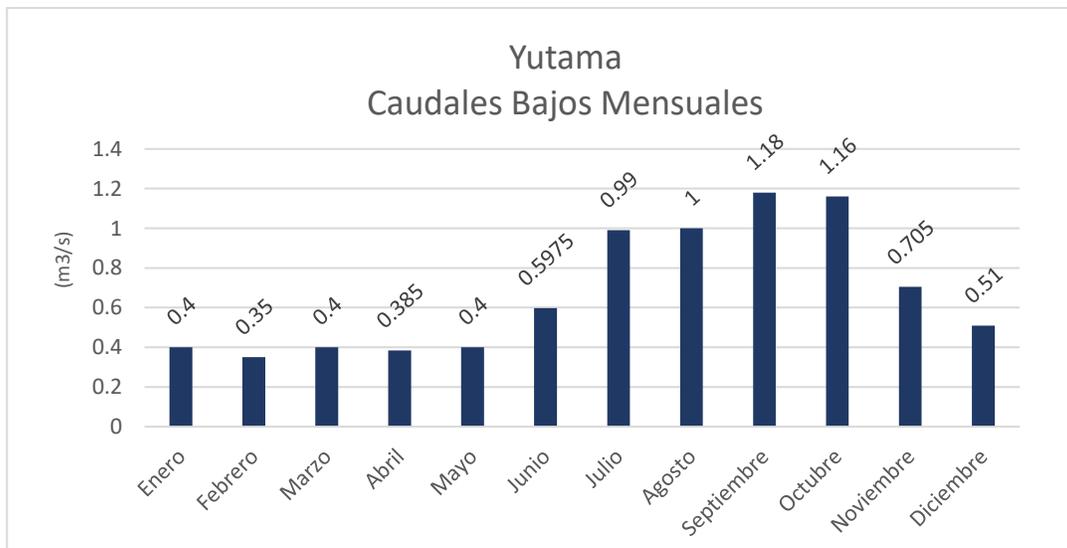


Figura 56. Caudales bajos mensuales de la estación Yutama.

La curva de duración de caudales obtenida de la resta de los caudales bajos mensuales a los caudales diarios promedio muestra que la estación Yutama tiene alrededor 55% de probabilidad de alcanzar o exceder 0.1 m³/s, 32% de probabilidad de exceder 1m³/s y solo un 10% de exceder los 2.5 m³/s. La curva de duración de caudales indica que, al restar los caudales bajos mensuales, la probabilidad de tener agua disponible es del 77% (Figura 57).

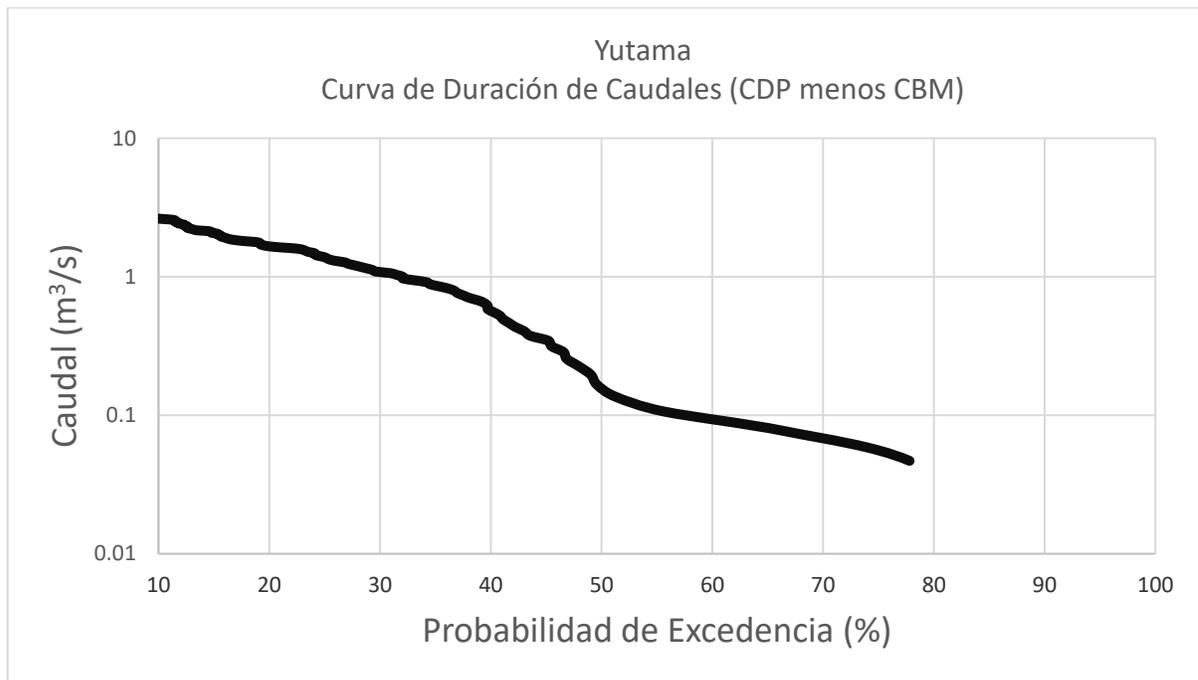


Figura 57. Curva de duración de caudales de la estación Yutama restando el caudal bajo mensual al caudal diario promedio.

8.3.7 Estación hidrométrica Nduave

La estación Nduave se encuentra sobre el río Yutama, en un tramo conocido también como río Esmeralda, el cual es de orden 5 (Mapa 2). En el registro del BANDAS se le asignó el número 20034 y cuenta con datos hidrométricos de 13 años, entre 1954 y 1967 (Tabla 2). La estación se encuentra 7 km aguas abajo de la estación Yutama a una

altitud de 1,621 msnm (Figura 58). No posee días con caudal cero, tiene un caudal medio anual de 2.18 m³/s y presenta caudales pico con alrededor de 20 m³/s, con un solo registro de 54 m³/s (Tabla 3, Figura 38).

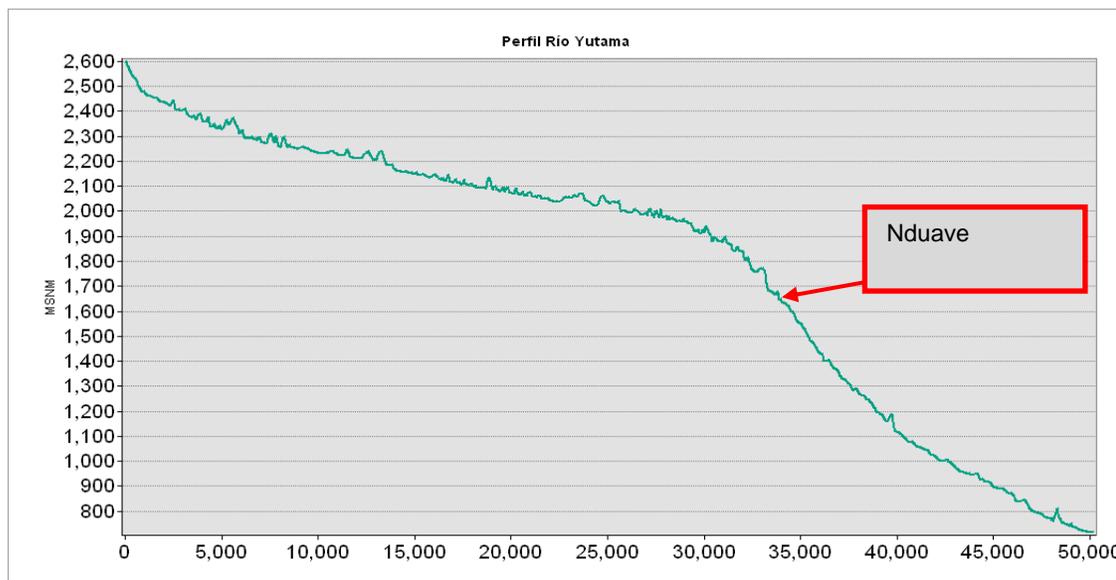


Figura 58. Perfil del río Yutama y localización de la estación Nduave

La curva de duración de caudales muestra que la probabilidad de excedencia para el 95% es de 0.2 m³/s, mientras que la probabilidad de excedencia para 1 m³/s es el 50%. Por otra parte, la probabilidad de alcanzar 3 m³/s es menor al 25% y solo hay un 10% de probabilidad de superar 5 m³/s (Figura 59).

La estación Nduave tiene un caudal medio anual de 2.18 m³/s, los valores de caudales extremadamente bajos se encuentran entre los 0.05 y 0.29 m³/s y su duración es de entre uno y 6.5 días, con una frecuencia de entre uno a 11 eventos al año (Figura 60). La estación es la tercera con menos datos hidrométricos de la cuenca del río Verde, ya que solo se midió durante 13 años.

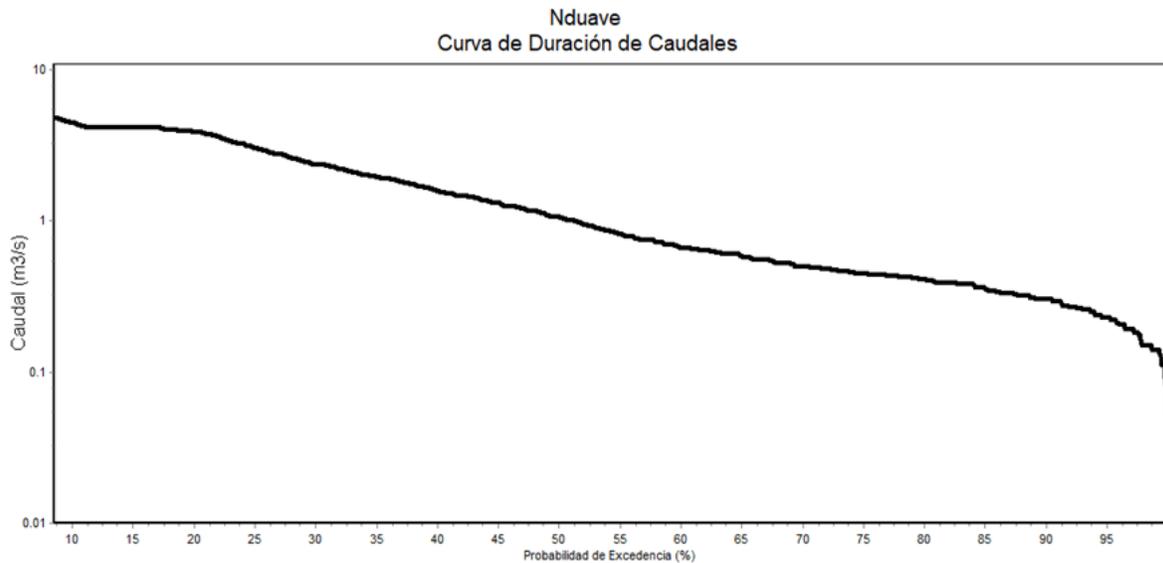


Figura 59. Curva de duración de caudales a estación Nduave.

Los caudales diarios promedio tienen un valor mínimo de 0.78 y máximo de 8.48 m³/s. Entre el inicio de diciembre y mediados de mayo son muy cercanos a 1 m³/s o superan por muy poco este valor, mientras que entre los meses de junio a finales de noviembre los caudales diarios promedio oscilan entre 2 y 9 m³/s, con una marcada caída a partir del mes de octubre (Figura 61).

El análisis de los caudales bajos mensuales muestra que, en el periodo de estiaje, especialmente entre enero y mayo son de alrededor de 0.44 m³/s, con el menor caudal bajo mensual correspondiente al mes de abril con 0.42 m³/s. Por otra parte, los caudales bajos mensuales entre julio y octubre superan 1.5 m³/s, siendo el mes de julio el que tiene un caudal mayor con 1.9 m³/s y un marcado descenso en el mes de noviembre (Figura 62).

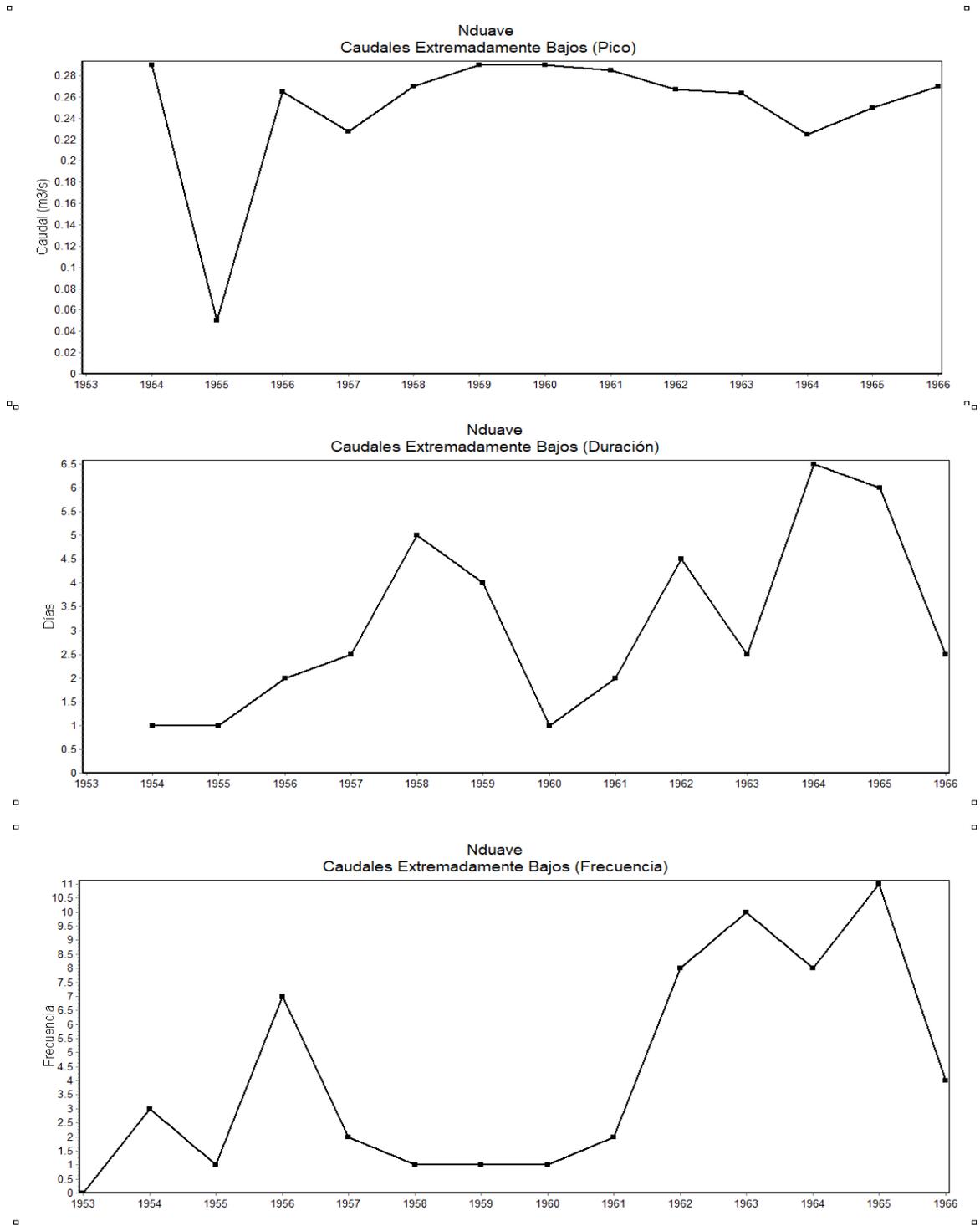


Figura 60 Caudales extremadamente bajos en la estación Nduave. Gráficas de caudal extremadamente bajo, duración y frecuencia.

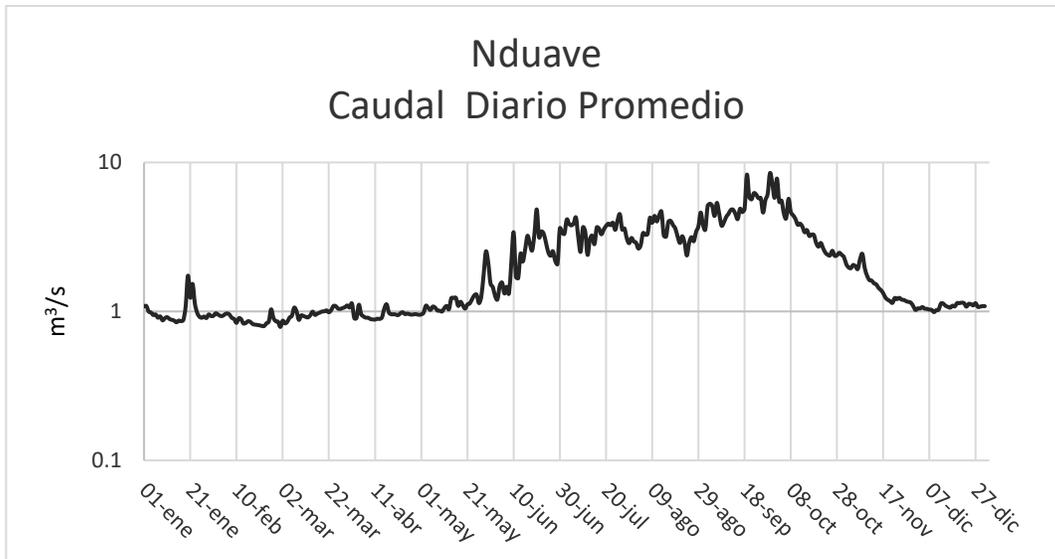


Figura 61. Logaritmo del caudal promedio diario de la estación Nduave.

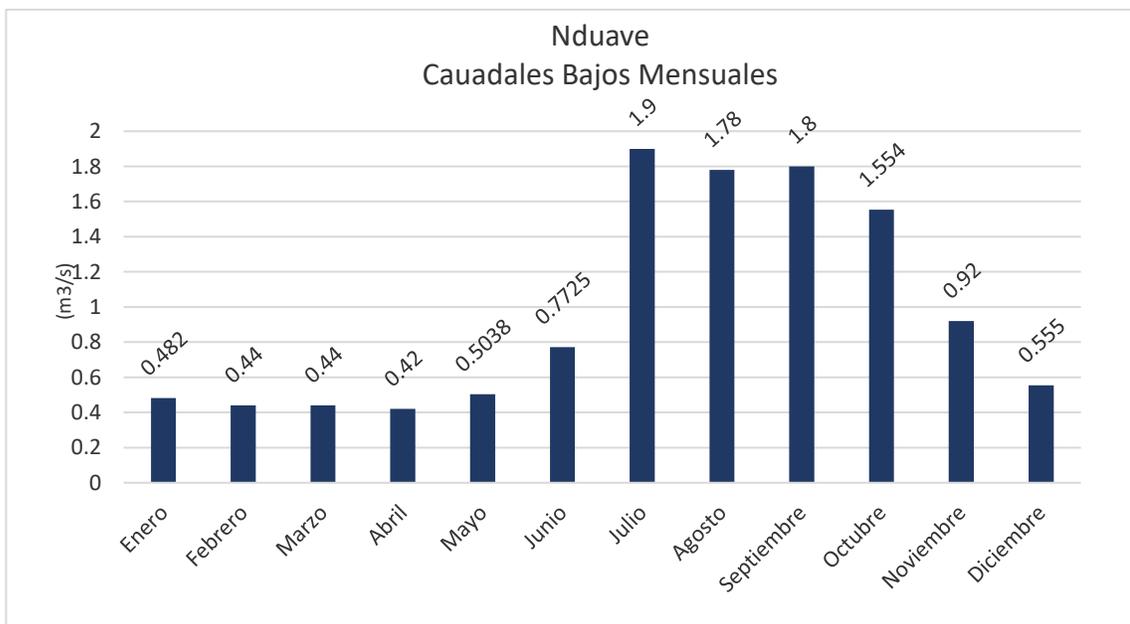


Figura 62. Caudales bajos mensuales de la estación Nduave.

La curva de duración de caudales, construida con la resta de los caudales bajos mensuales a los caudales diario promedio, muestra que la probabilidad de ocurrencia de 0.2 m³/s es cercana al 100%, mientras que hay un 96% de probabilidad de igualar o exceder 0.3 m³/s, alcanzar 1 m³/s es de alrededor del 40% y solo se hay un 10% de probabilidad de alcanzar o exceder los 2.6 m³/s (Figura 63).

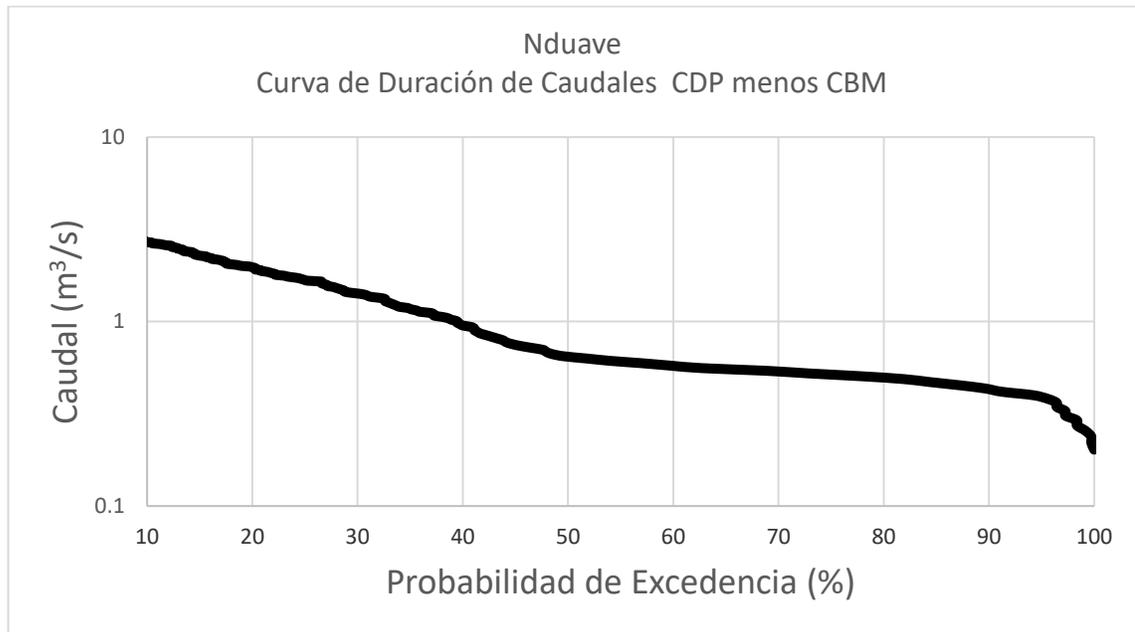


Figura 63. Curva de duración de caudales de la estación Nduave restando el caudal bajo mensual al caudal diario promedio.

8.3.8 Estación hidrométrica Paso Ancho.

La estación Paso Ancho se encuentra al sureste de la cuenca, en la vertiente este sobre el río Atoyac que es de orden 7 (Mapa 2), tiene la clave 20036 en el BANDAS y se ubica específicamente en la cuenca del bajo río Atoyac. Se encuentra 60 km aguas abajo de la estación Tlapacoyan, a 1, 266 msnm (Mapa 4, Figura 64). Cuenta con 49 años de datos hidrométricos (1957-2007), con excepción del año 2001. Los datos hidrométricos de

la estación Paso Ancho indican que no tiene días con caudal cero y tiene un caudal anual promedio de 15.21 m³/s (Tabla 3, Figura 38).

Actualmente en ese sitio se encuentra suspendida la construcción el Proyecto “Presa Bicentenario de la Independencia (Paso Ancho)”, la cual tendrá 63.5 m de altura y almacenará al NAME (Nivel de Agua Máximo Extraordinario) 62.98 Mm³ (Gobierno del Estado de Oaxaca, 2015).

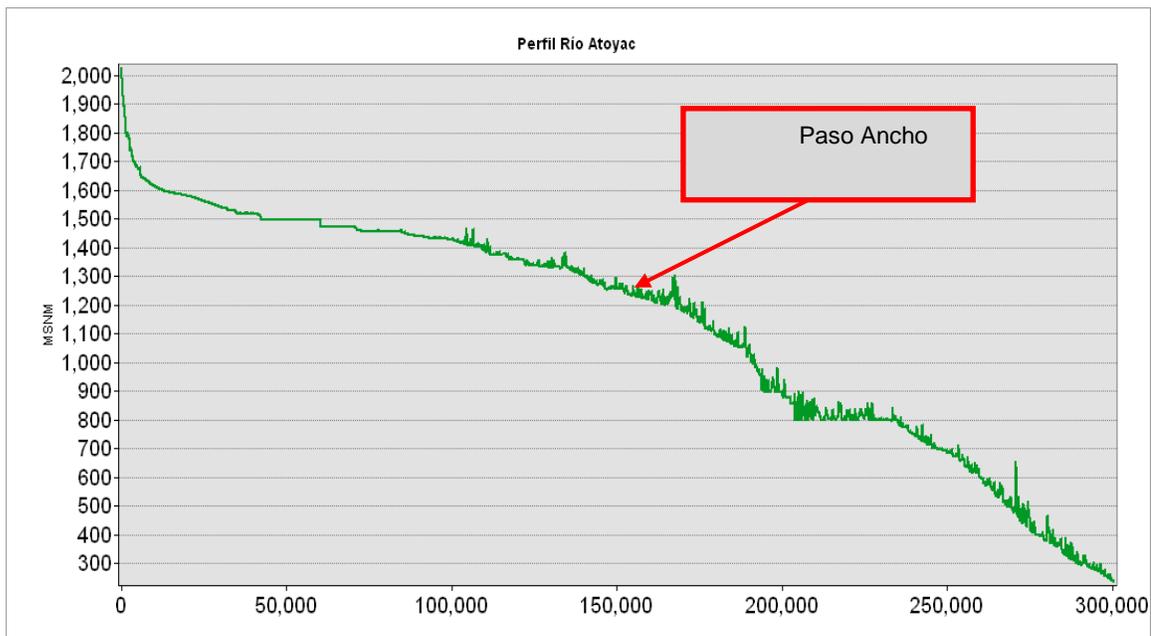


Figura 64. Localización de la estación Paso Ancho en el perfil del río Atoyac.

La curva de duración de caudales muestra que la probabilidad de excedencia para 1 m³/s es de 95%, mientras que para exceder 10 m³/s es de 30% y menos del 10% de probabilidad de superar los 50 m³/s (Figura 65).

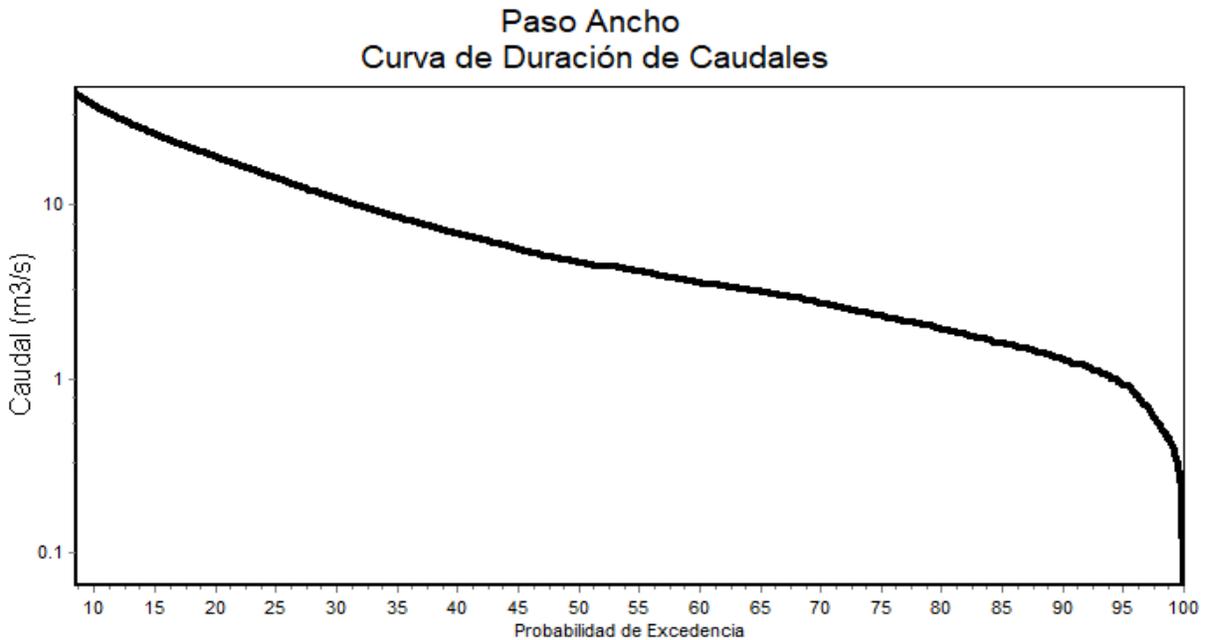


Figura 65. Curva de duración de caudales de la estación Paso Ancho.

Los caudales extremadamente bajos para la estación Paso Ancho oscilan entre 0.4 y 1.25 m³/s con una duración máxima de 40 días, para el año 1997 y mínima de dos días para 1966, 1979 y 1999. De todos los años analizados, 10 años no presentaron caudales extremadamente bajos. La frecuencia de estos caudales extremadamente bajos es de 5 episodios por año, con un máximo de 11 (Figura 66).

Los caudales diarios promedio muestran que la estación Paso Ancho presenta los caudales más bajos durante la segunda mitad del mes de marzo (1.7 m³/s en promedio) y los caudales más altos durante el mes de septiembre (alrededor de 50 m³/s en promedio), por lo tanto, el periodo de lluvia ocurre entre abril y octubre (Figura 67). Además, se obtuvieron valores mínimos de 1.64 m³/s y máximo de 56.47 m³/s, correspondientes a los meses de marzo y octubre respectivamente.

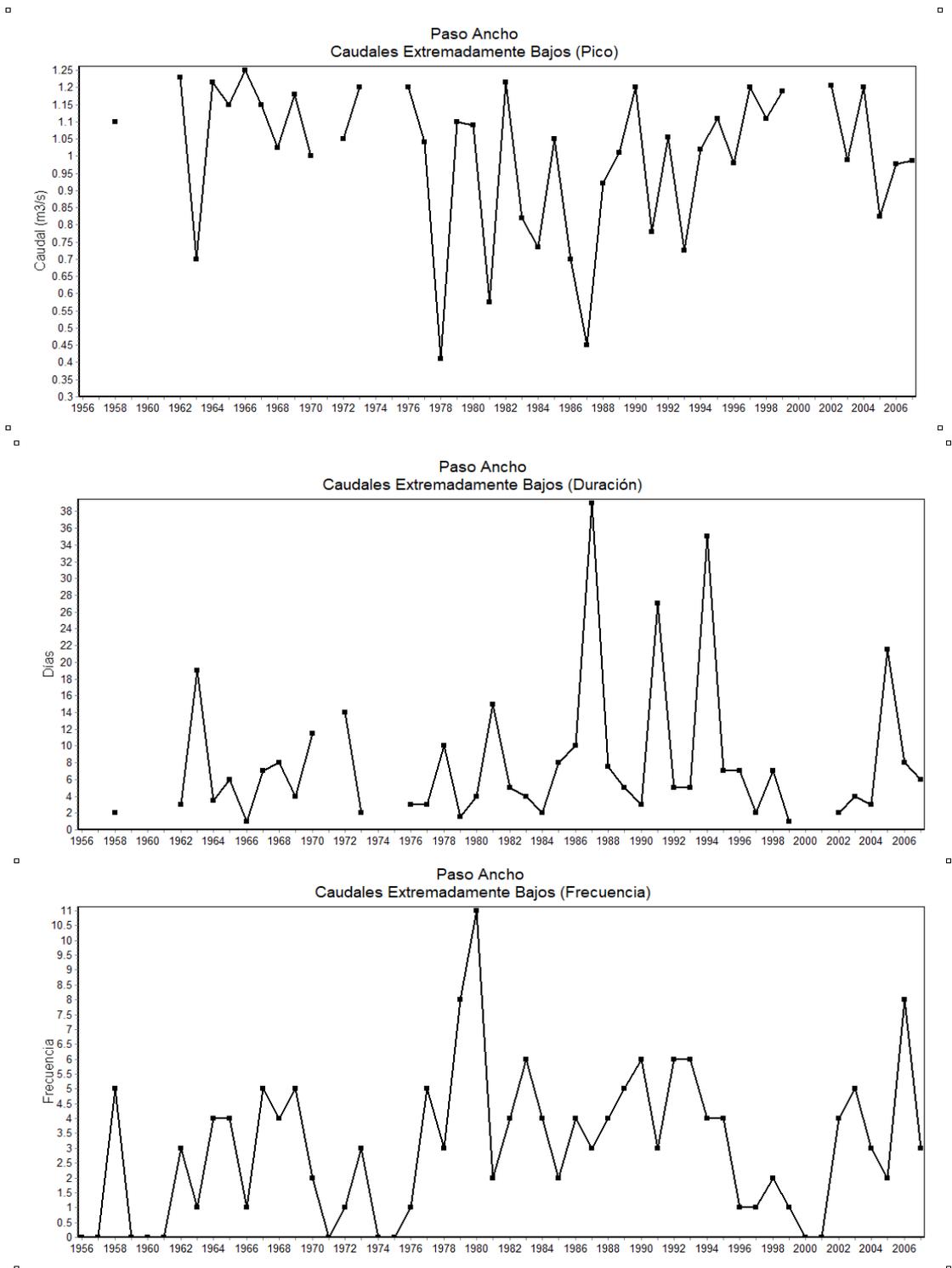


Figura 66. Caudales extremadamente bajos en la estación Paso Ancho. Gráficas de caudal extremadamente bajo, duración y frecuencia.

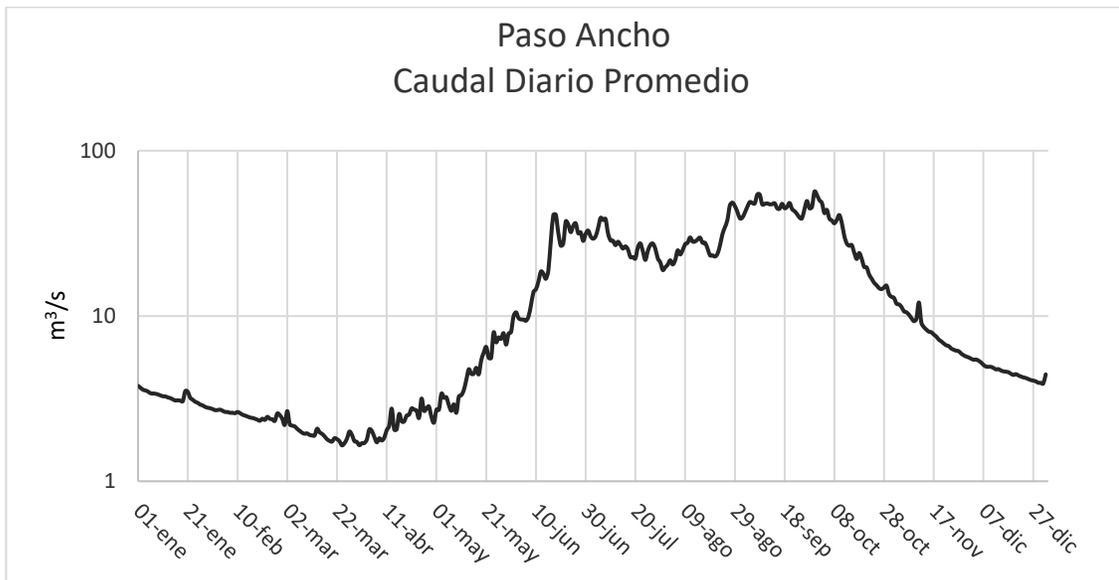


Figura 67. Logaritmo del caudal diario promedio de la estación Paso Ancho.

Por su parte, los Caudales Bajos Mensuales (CBM) para la estación paso ancho oscilan entre 1.95 m³/s para el mes de marzo y 8.68 m³/s para el mes de octubre. Siendo los meses de enero a mayo los más bajos (Figura 68).

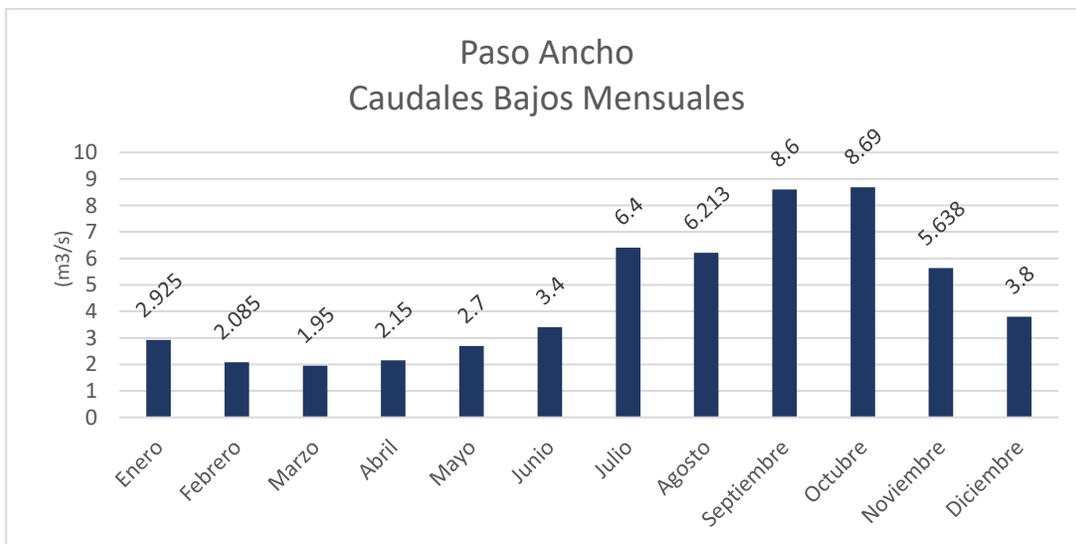


Figura 68. Caudales bajos mensuales de la estación Paso Ancho.

La curva de duración de caudales, generada a partir de la resta de los caudales bajos mensuales a los caudales diarios promedio, muestra que la probabilidad de alcanzar o exceder $1 \text{ m}^3/\text{s}$ es cercana al 57%, mientras que existe una probabilidad mayor al 37% de alcanzar $10 \text{ m}^3/\text{s}$ y 10% de probabilidad de alcanzar o exceder los $33 \text{ m}^3/\text{s}$. Al restar los caudales bajos mensuales la probabilidad de tener caudal disponible es de alrededor de 86% con un valor de $0.2 \text{ m}^3/\text{s}$. (Figura 69).

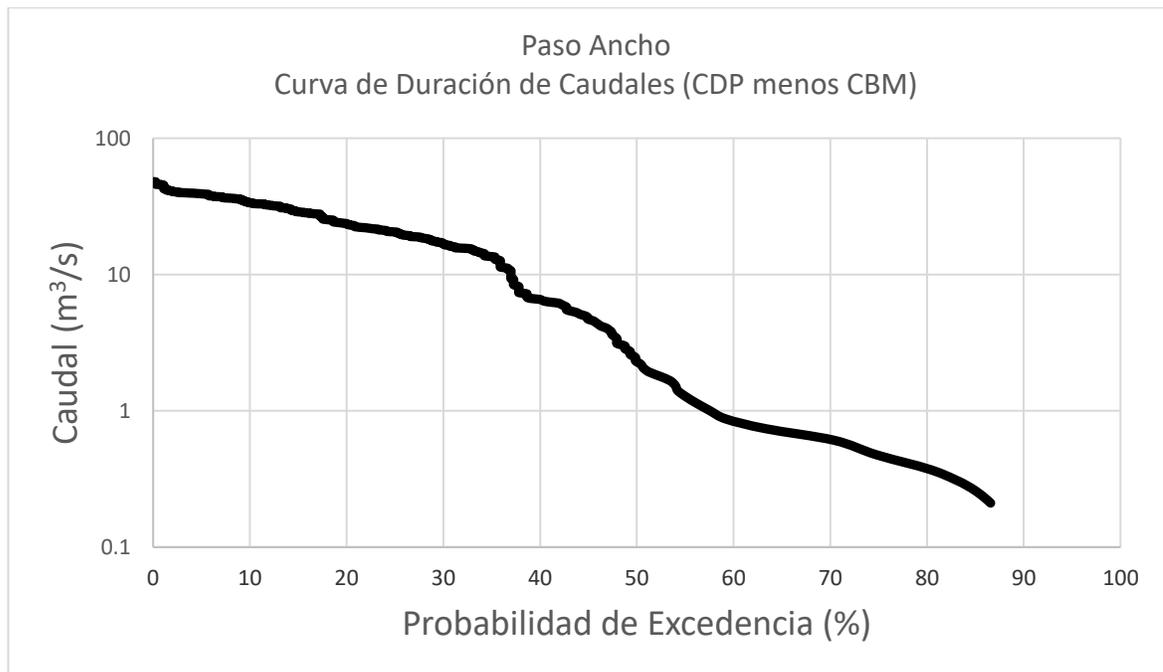


Figura 69. Curva de duración de caudales de la estación Paso Ancho restando el caudal bajo mensual al caudal diario promedio.

Por otra parte, el cálculo de la potencia diaria promedio (kW), para cada uno de los escenarios de carga propuestos ($H= 10, 50$ y 100 m) se muestra en la tabla 4 y la figura 70. Los valores más altos, con carga de 100 m alcanza una potencia de $47,087 \text{ kW}$ y una mínima en el escenario de 10 m de carga de 137 kW .

Tabla 4. Máximos y mínimos de potencial bruto de la estación Paso Ancho.

Potencia diaria promedio (kW) y Potencia menos CBM				
Potencia	Máximos/Mínimos	Carga		
		H= 10 m	H= 50 m	H= 100 m
Potencia diaria promedio (kW)	Máximos	4, 708.789435	23, 543.94718	47, 087.89435
	Mínimos	137.4746045	687.3730226	1, 374.746045
Potencia menos CBM (kW)	Máximos	3, 991.678435	19, 958.39218	39, 916.78435
	Mínimos	0.851489135	4.257445673	8.514891346

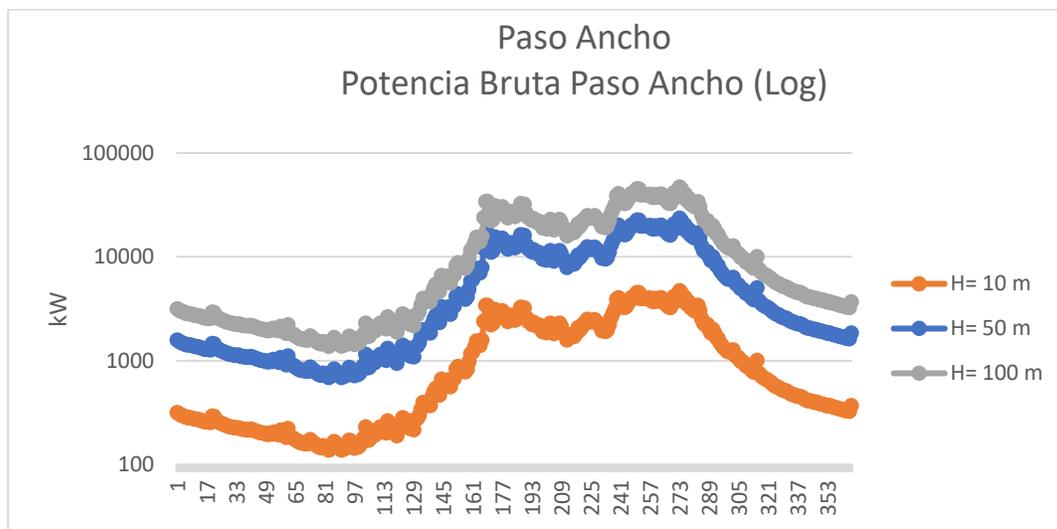


Figura 70. Potencia diaria promedio o potencia bruta de la estación Paso Ancho.

En el siguiente análisis se muestra el comportamiento de la potencia cuando se restan los caudales bajos mensuales (CBM) (Tabla 4). Los días con caudales diarios menores a los CBM se establecieron como potencia cero, ya que serían días donde no habría caudal disponible para generación; en el caso de la estación Paso Ancho se registraron 41 días bajo esta condición. Finalmente, se presentan las gráficas comparativas de las diferencias de potencial para cada uno de los tres escenarios de carga en escala logarítmica (Figura 71; a, b y c).

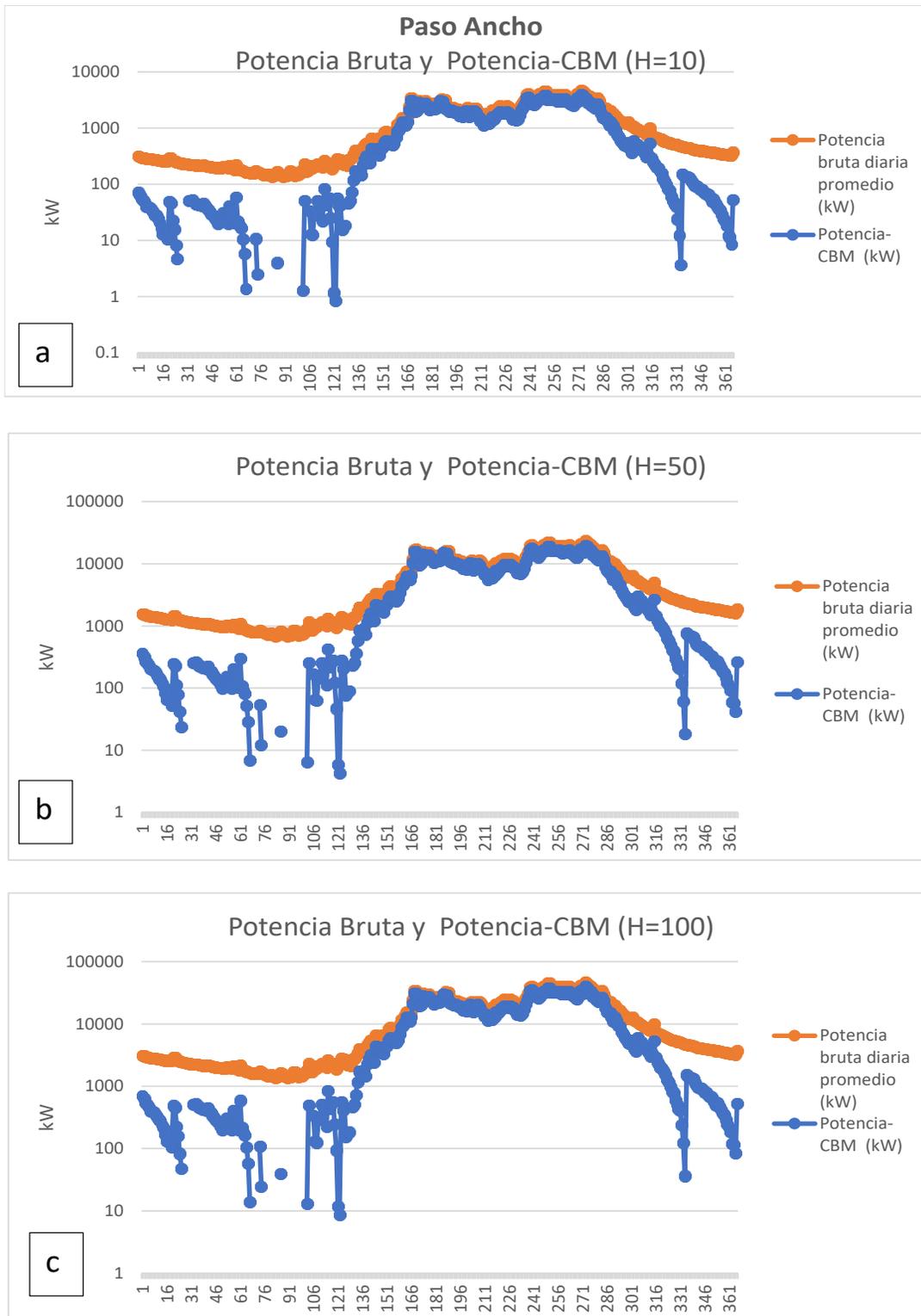


Figura 71. Potencia bruta y potencia menos Caudal Bajo Mensual (CBM)) para cada escenario de carga de la estación Paso Ancho.

8.3.9 Estación hidrométrica Yutacua

La estación Yutacua se encuentra en la vertiente oeste sobre el río Verde que es de orden 8 (Mapa 2), en la subcuenca del alto río Verde, también denominada Yalestán. El número asignado en la base de datos BANDAS para esta estación es 20042. La estación se encuentra 24 km aguas abajo de la confluencia de río Yutama o Esmeralda con el río Verde y 1.3 km aguas arriba de la confluencia del río Putla con el río Verde (Mapa 4). La estación se encuentra a 373 msnm y tiene registros de 38 años, entre 1969 y 2007 (Figura 72 y Tabla 2), no presenta días con caudales cero y tiene un caudal anual promedio de 30.85 m³/s (Tabla 3, Figura 38).

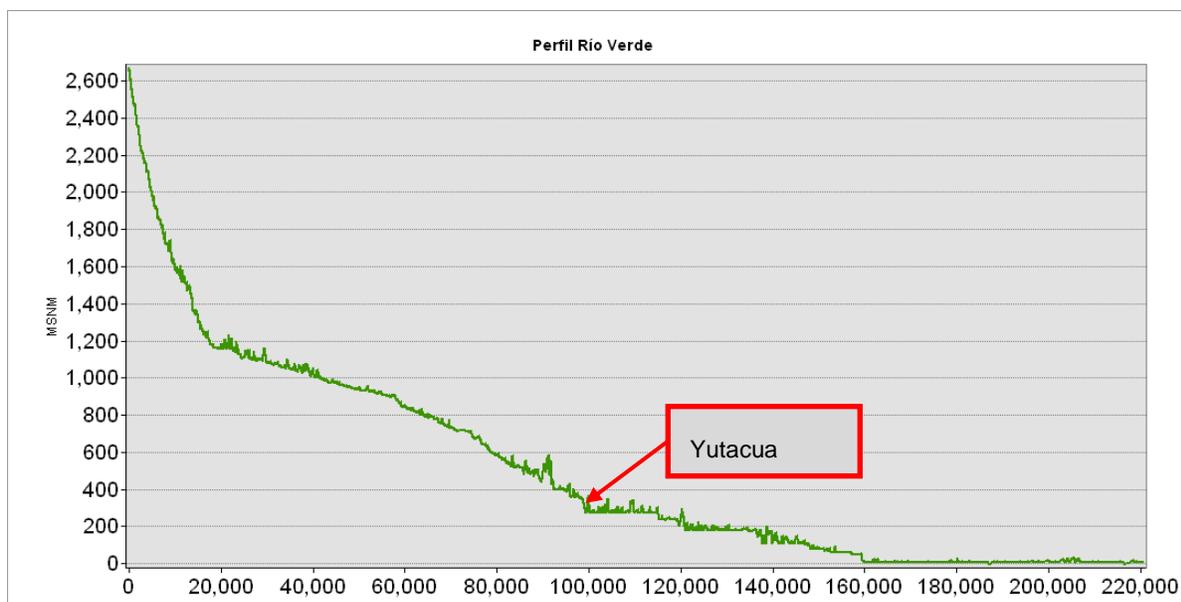


Figura 72. Localización de la estación Yutacua en el perfil del río Verde.

La curva de duración de caudales de la estación Yutacua presenta una probabilidad de excedencia de 95% para un caudal de 8 m³/s, de 50% para 12 m³/s y del 10% para un caudal de 80 m³/s. Es importante señalar que la probabilidad de superar los 4 m³/s es muy cercana al 100% (Figura 73).

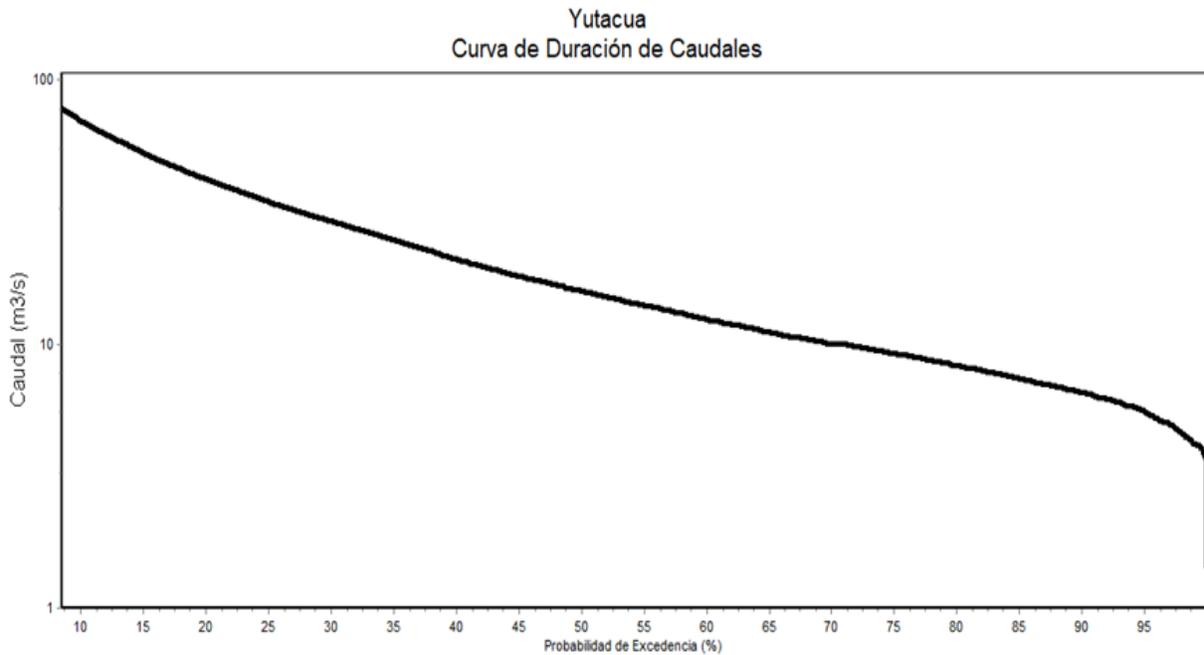


Figura 73. Curva de duración de caudales de la estación Yutacua.

Por su parte, los caudales extremadamente bajos para la estación Yutama presentan valores entre los 4.5 y los 6.5 m³/s, con una duración de entre uno y 28 días, aunque generalmente duran menos de ocho días y su frecuencia es de entre uno a ocho episodios en un año. Cabe recalcar que durante siete de los 38 años con mediciones hidrométricas no se presentaron estos caudales considerados extremadamente bajos (Figura 74).

En cuanto a los caudales diarios promedio la estación Yutacua presenta un mínimo 7.83 m³/s a inicios de abril y un valor máximo 95.67 m³/s a principios de septiembre, con lluvias entre mediados de mayo a principios de octubre y una reducción del caudal promedio diario muy lenta entre los meses de octubre a abril (Figura 75).

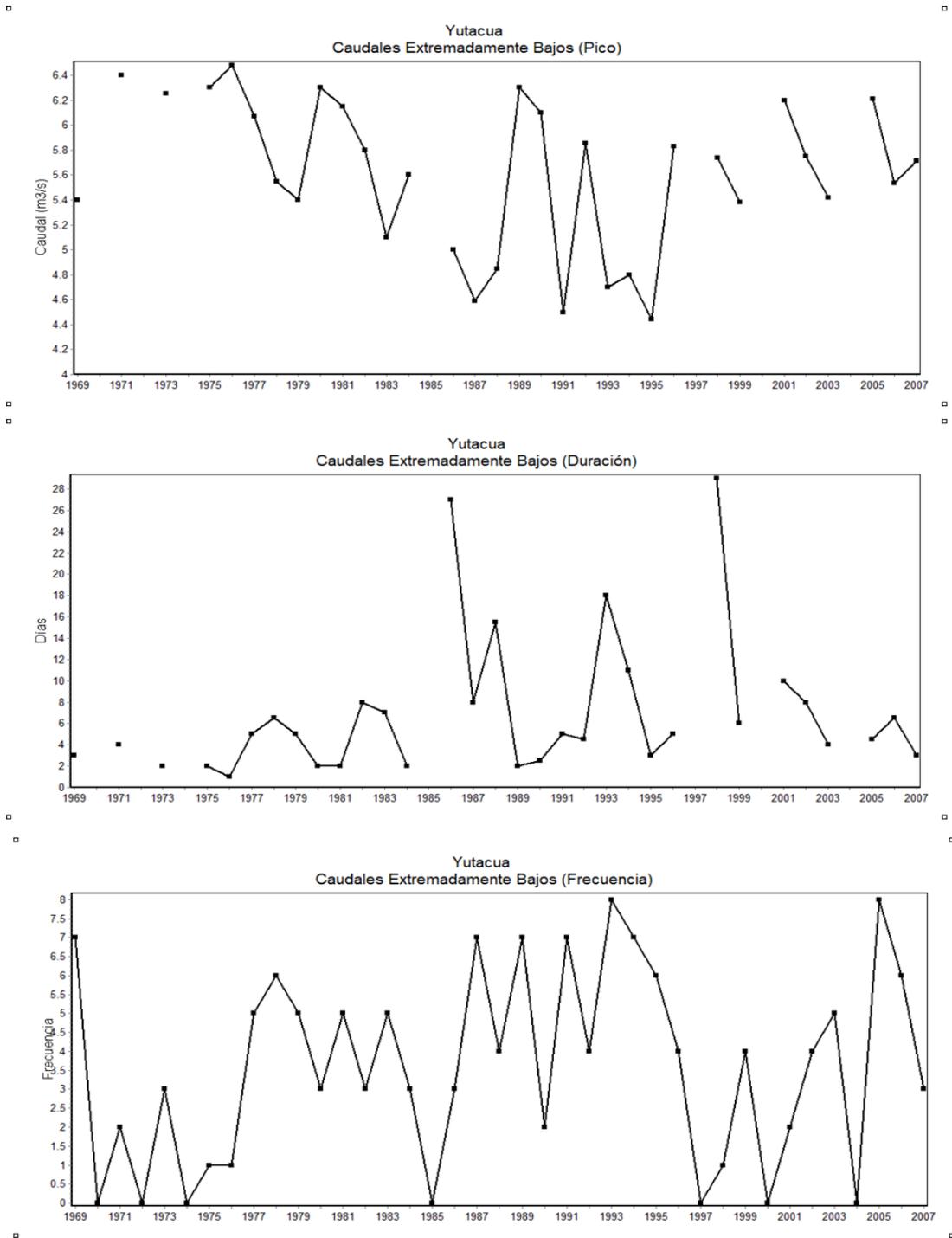


Figura 74. Caudales extremadamente bajos para la estación Yutacua. Gráficas de Caudal extremadamente bajo, duración y frecuencia.

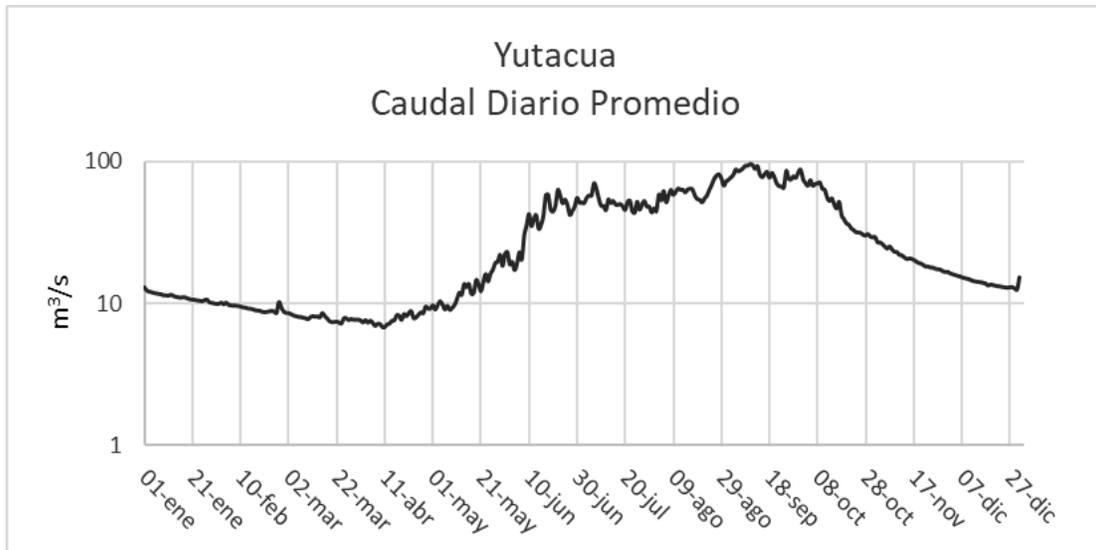


Figura 75. Caudal diario promedio de la estación Yutacua.

El comportamiento de los caudales bajos mensuales (CBM), se encuentran entre 8 y 28.55 m³/s para los meses de marzo y septiembre respectivamente, siendo los meses de febrero a marzo los únicos por debajo de 10 m³/s (Figura 76).

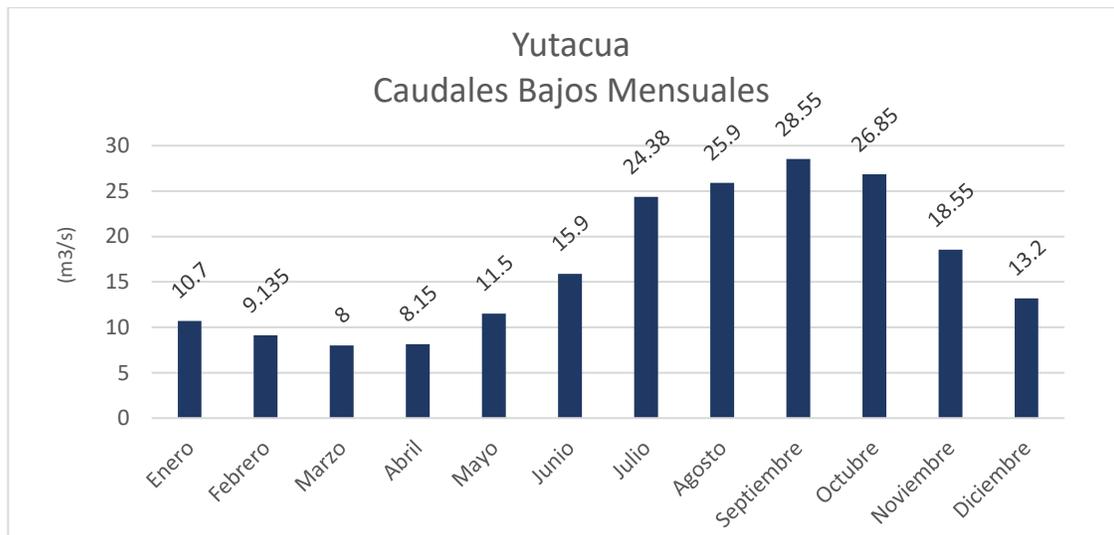


Figura 76. Caudales Bajos Mensuales de la estación Yutacua.

La curva de duración de caudales construida a partir de la resta de los caudales bajos mensuales a los caudales diarios promedio muestra más del 50% de probabilidad de superar los 2.4 m³/s, 40% de alcanzar los 7 m³/ y 60% de probabilidad de alcanzar o exceder 1m³/s. Esta curva de duración de caudales muestra una probabilidad de 75% para un caudal de 0.2 m³/s (Figura 77).

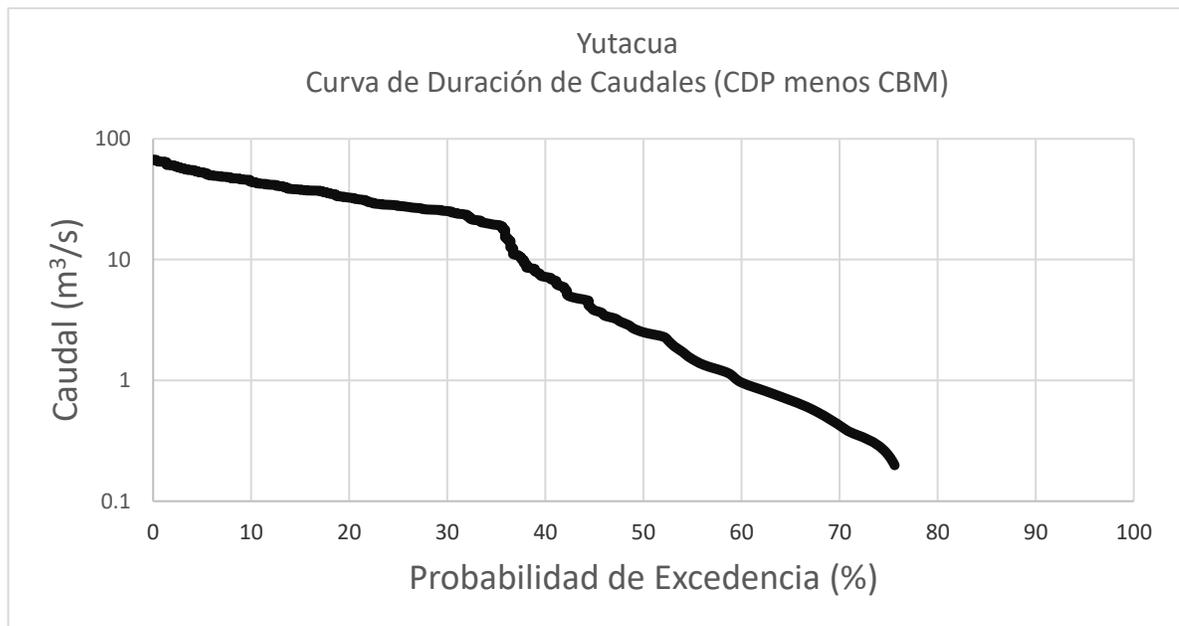


Figura 77. Curva de duración de caudales de la estación Yutacua restando el caudal bajo mensual al caudal diario promedio.

El cálculo de la potencia diaria promedio en los tres escenarios de carga se muestra en la tabla 5 y en la figura 78, con valores mínimos de 570 kW en el escenario de carga de 10 m y de cerca de 79,774 kW en el escenario de 100 m de carga.

Tabla 5. Máximos y mínimos de potencial bruto de la estación Yutacua.

Potencia diaria promedio (kW) y Potencia menos CBM				
Potencia	Máximos/Mínimos	Carga		
		H= 10 m	H= 50 m	H= 100 m
Potencia diaria promedio (kW)	Máximos	7,977.44295	39,887.21475	7,9774.4295
	Mínimos	570.2678769	2,851.339385	5,702.678769
Potencia menos CBM (kW)	Máximos	5,596.8012	27,984.006	55,968.012
	Mínimos	0.235188462	1.175942308	2.351884615

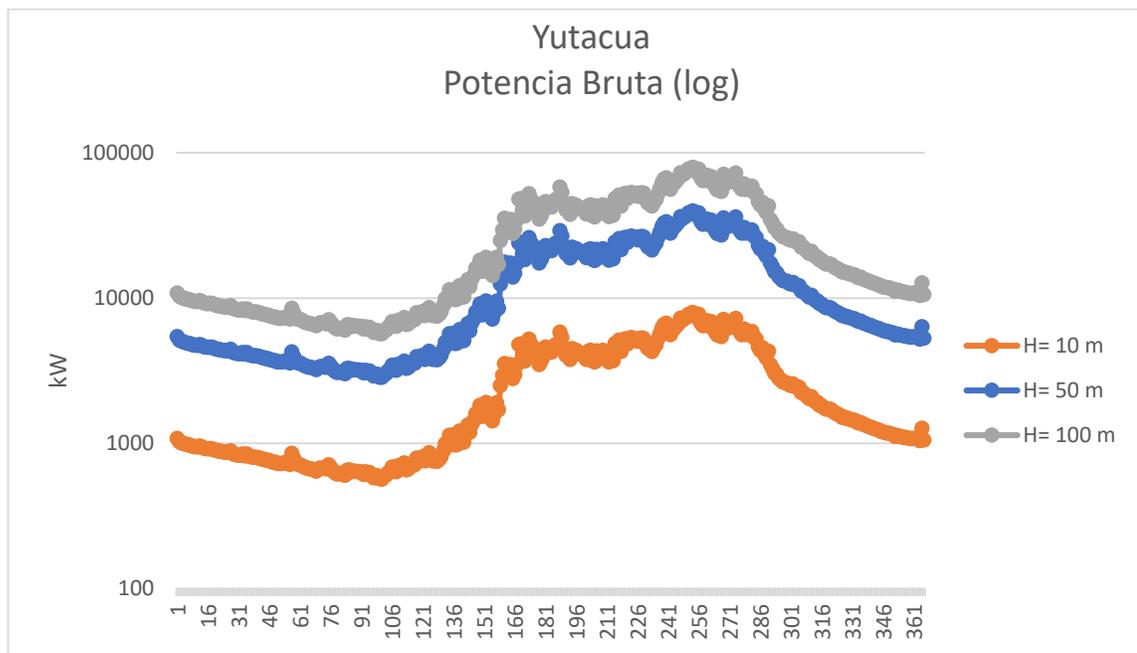


Figura 78. Potencia diaria promedio o bruta de la estación Yutacua.

Por otra parte, se muestra los valores de potencia cuando los caudales bajos mensuales son restados al caudal diario promedio (Tabla 5), se establecieron con potencia cero los días en los que el caudal promedio diario era menor al caudal bajo mensual. De esta manera, en la estación Yutacua se presentaron 89 días con esta condición, es decir con potencia cero (Figura 79; a, b, c).

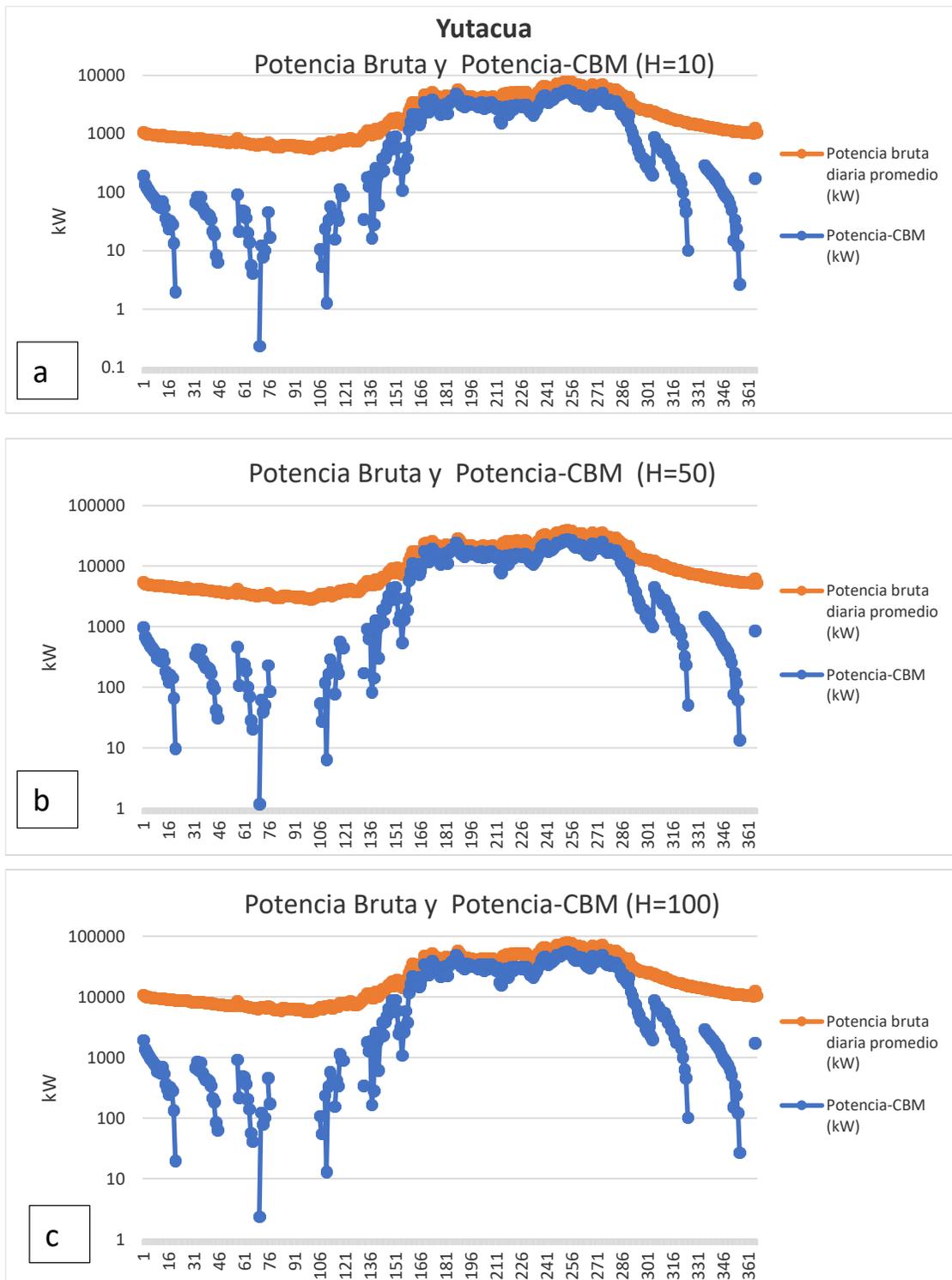


Figura 79. Potencia bruta y potencia menos Caudal Bajo Mensual (CBM) para cada escenario de carga de la estación Yutacua.

8.3.10 Estación hidrométrica Nusutia

La estación Nusutia es la única ubicada sobre el cauce del río Putla, el cual es de orden 6 (Mapa 2), este río se encuentra en la subcuenca con el mismo nombre en la vertiente oeste de la cuenca del río Verde. En la base de datos del BANDAS es la estación número 20041. Se encuentra 6 km aguas arriba de la confluencia del río Putla con el río Verde (Mapa 4), a una altitud de 380 msnm y cuenta con registros de 38 años, entre 1969 y 2007 (Figura 80), durante los cuales no se presentan días con caudal cero, además de tener un caudal anual promedio de 68 m³/s (Tabla 3, Figura 38).

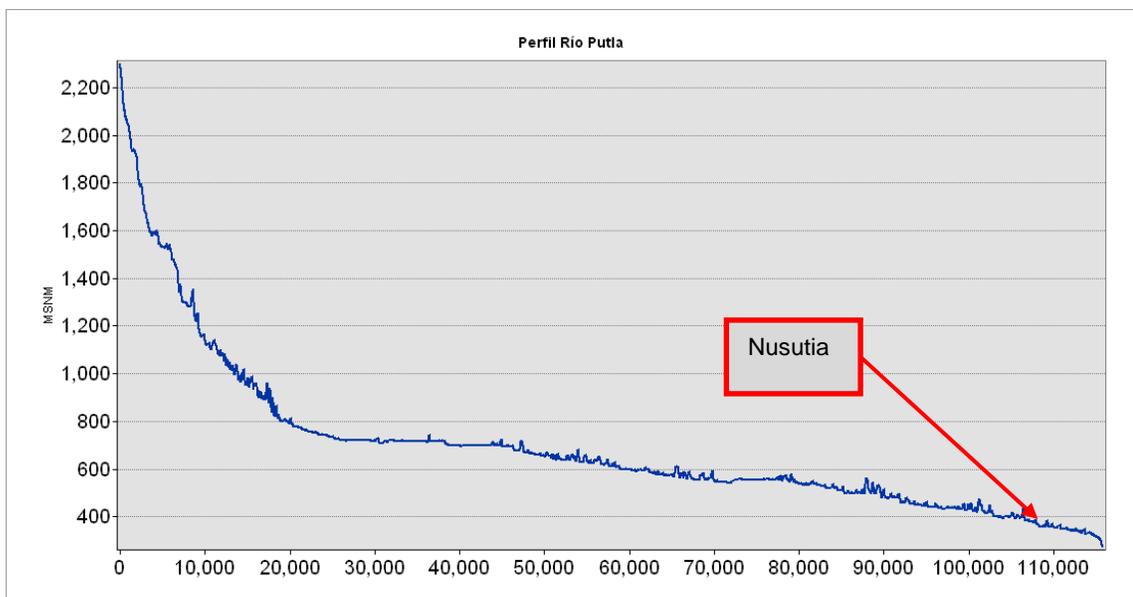


Figura 80. Localización de la estación Nusutia en el perfil del río Putla.

La curva de duración de caudales de la estación Nusutia muestra que la probabilidad de excedencia para un caudal de 9 m³/s es del 95%, mientras que la probabilidad de alcanzar o exceder 30 m³/s es del 50% y superar los 100 m³/s es de 25%. Mientras que la probabilidad de superar los 7 m³/s es de más del 99% (Figura 81).

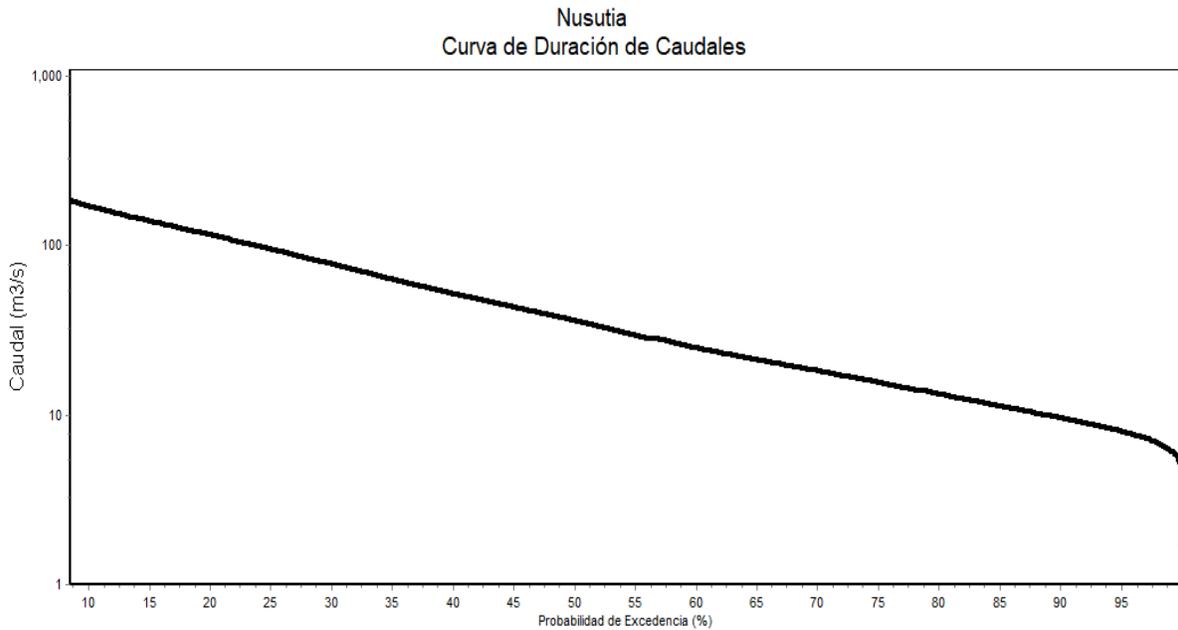


Figura 81. Curva de duración de caudales de la estación Nusutia.

El comportamiento de los caudales extremadamente bajos para la estación Nusutia muestra valores que oscilan entre 4.5 y 9.5 m³/s. Con una duración de máxima de 100 días, valor que solo se presentó durante 1988, mientras que el resto de los valores se encuentran entre uno y 50 días. Por su parte la frecuencia anual de estos caudales extremadamente bajos ocurre entre uno y cinco episodios al año, con mayor frecuencia de entre dos y tres episodios al año (Figura 82).

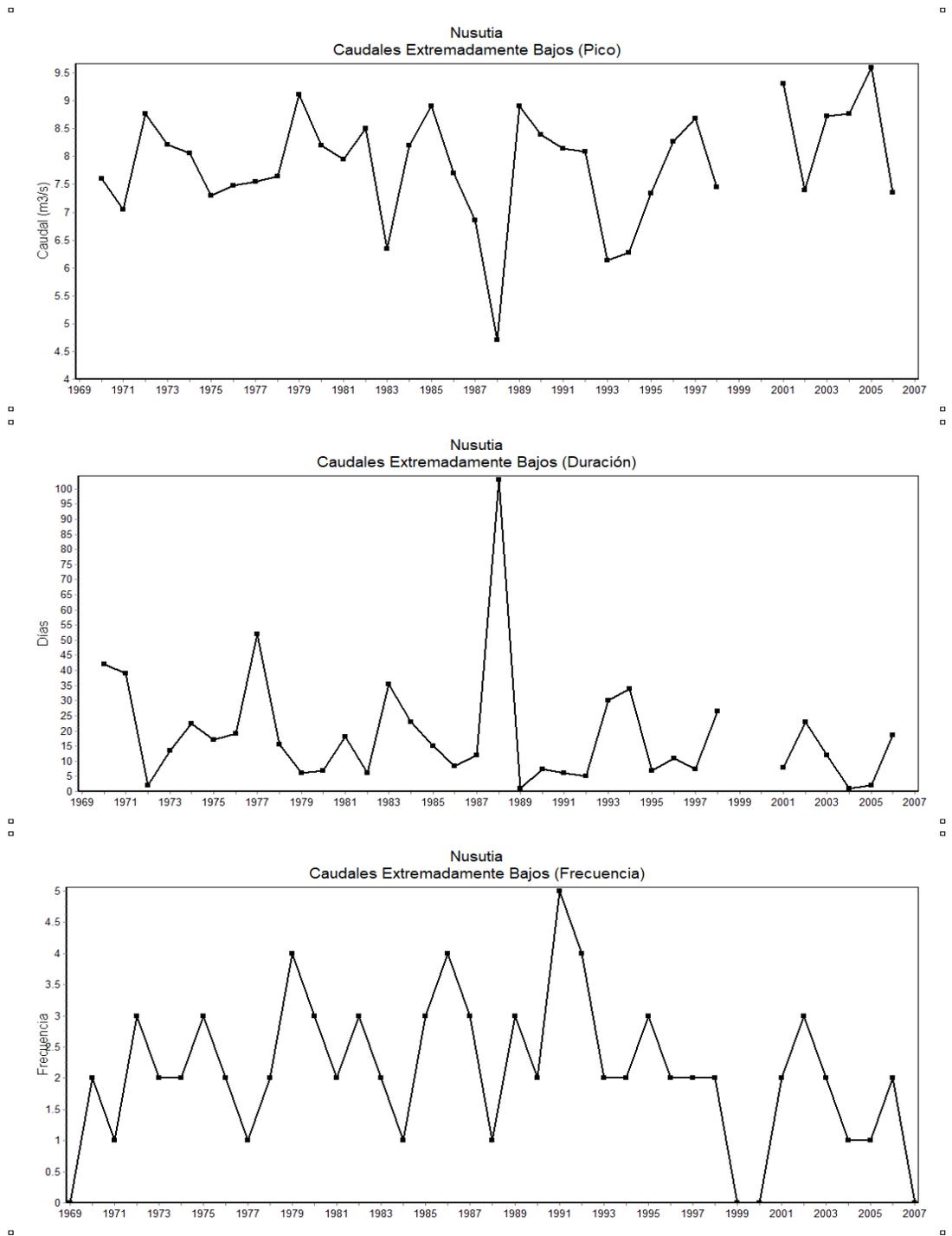


Figura 82. Caudales extremadamente bajos para la estación Nusatia. Gráficas de caudal extremadamente bajo, duración y frecuencia.

La estación Nusutia registra los menores caudales diarios promedio durante abril, con un mínimo de 9.24 m³/s, mientras que el periodo de mayor caudal ocurre en la primera mitad de septiembre, con un valor promedio máximo de 212.6 m³/s, la estación de lluvias ocurre entre principios de junio y finales de octubre. Una de las características más importantes de esta estación es que en el punto con menor caudal, se encuentra apenas por debajo de los 10 m³/s (Figura 83).

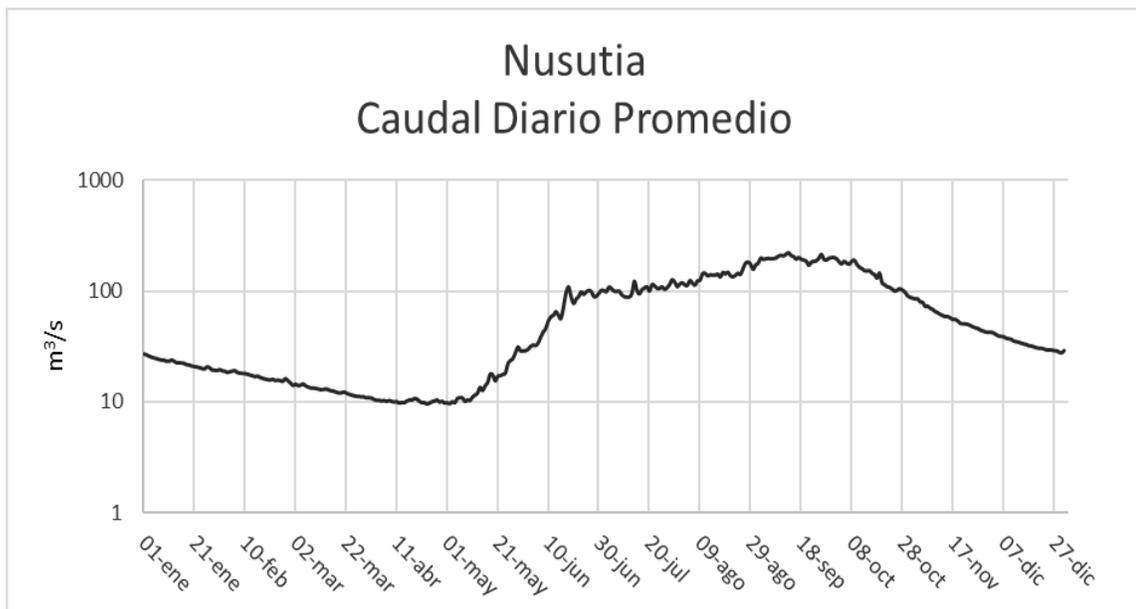


Figura 83. Caudal diario promedio de la estación Nusutia.

Por su parte, los Caudales Bajos Mensuales presentan su punto más bajo durante el mes de abril, con 11.3 m³/s, mientras que el valor más alto se presente durante el mes de septiembre, con 82.25 m³/s. El periodo con Caudales Bajos Mensuales menores es de febrero a mayo, y en ningún punto son menores a 11 m³/s (Figura 84).

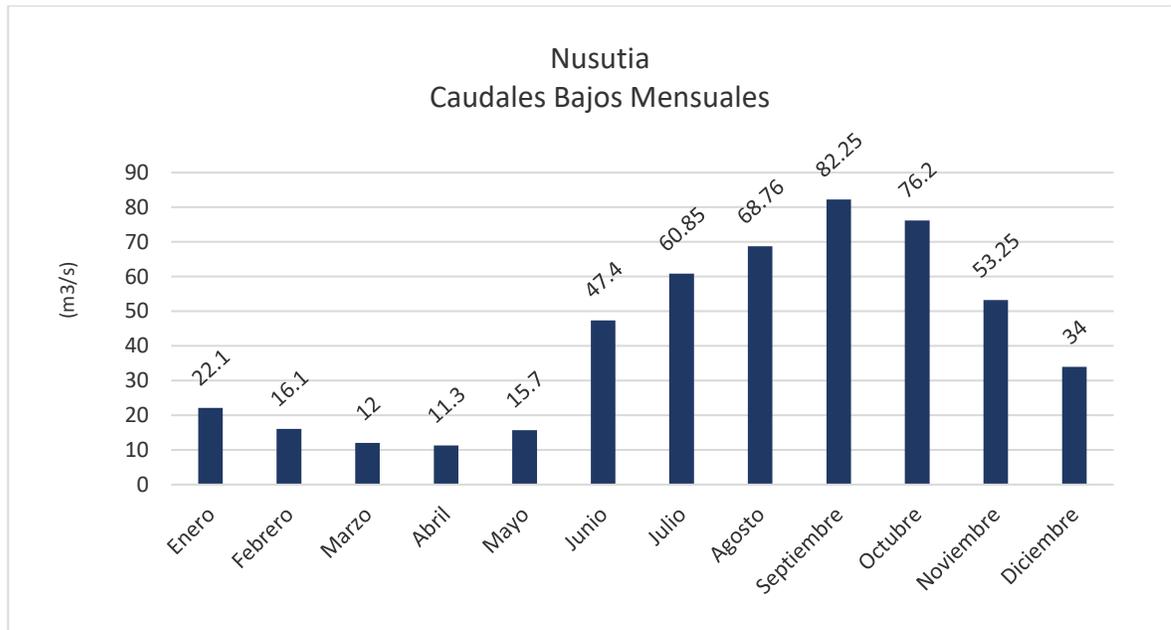


Figura 84. Caudales Bajos Mensuales para la estación Nusutia.

Se generó una curva de duración de caudales utilizando el resultado de la resta de los caudales bajos mensuales a los caudales diarios promedio. Para la estación Nusutia se observó que existe un 50% de probabilidad de alcanzar o exceder 3.2 m³/s y un 10% de probabilidad de exceder los 100 m³/s, sin embargo, solo se presenta un 65% de probabilidad de alcanzar o exceder 0.65 m³/s, el 35% restante del tiempo no se tendría caudal disponible (Figura 85).

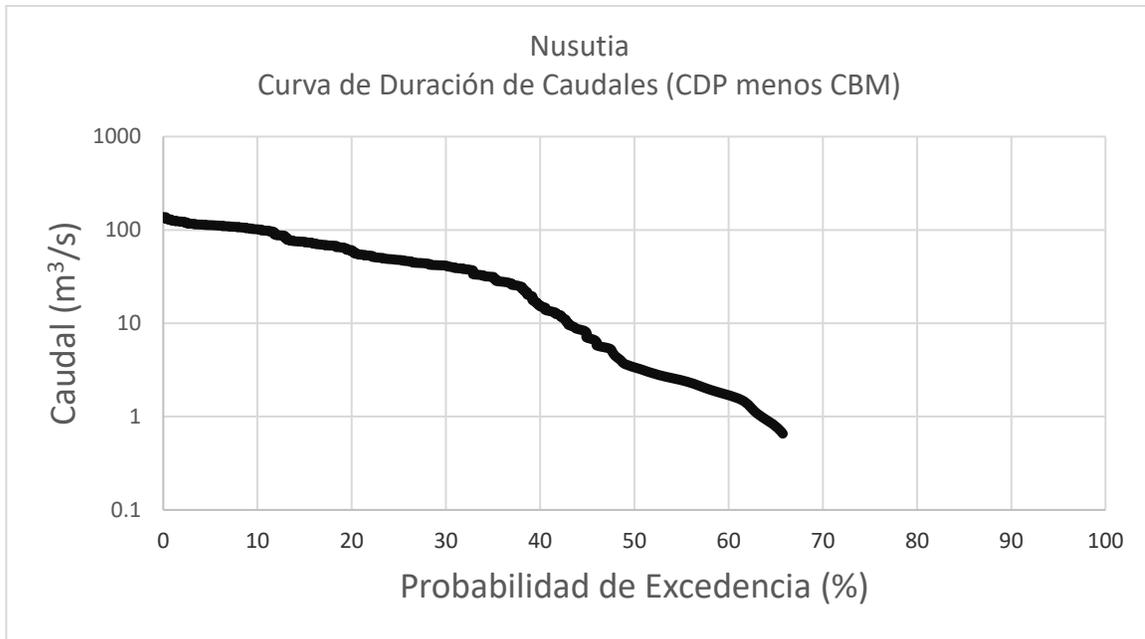


Figura 85. Curva de duración de caudales de la estación Nusutia restando el caudal bajo mensual al caudal diario promedio.

Tabla 6. Máximos y mínimos de potencial bruto de la estación Nusutia.

Potencia diaria promedio (kW) y Potencia menos CBM				
Potencia	Máximos/Mínimos	Carga		
		H= 10 m	H= 50 m	H= 100 m
Potencia diaria promedio (kW)	Máximos	18,284.19242	91,420.96212	182,841.9242
	Mínimos	801.0732808	4,005.366404	8,010.732808
Potencia menos CBM (kW)	Máximos	11,425.77617	57,128.88087	114,257.7617
	Mínimos	7.376365385	36.88182692	73.76365385

La potencia diaria promedio en los tres diferentes escenarios de carga se muestra en la tabla 6 y a figura 86. En el escenario con 100 m de carga alcanzan valores máximos de más de 182,841 kW y mínimos de 8,010 kW, mientras que en el escenario con carga de 10 m se encuentra entre 18,248 kW a 800 kW.

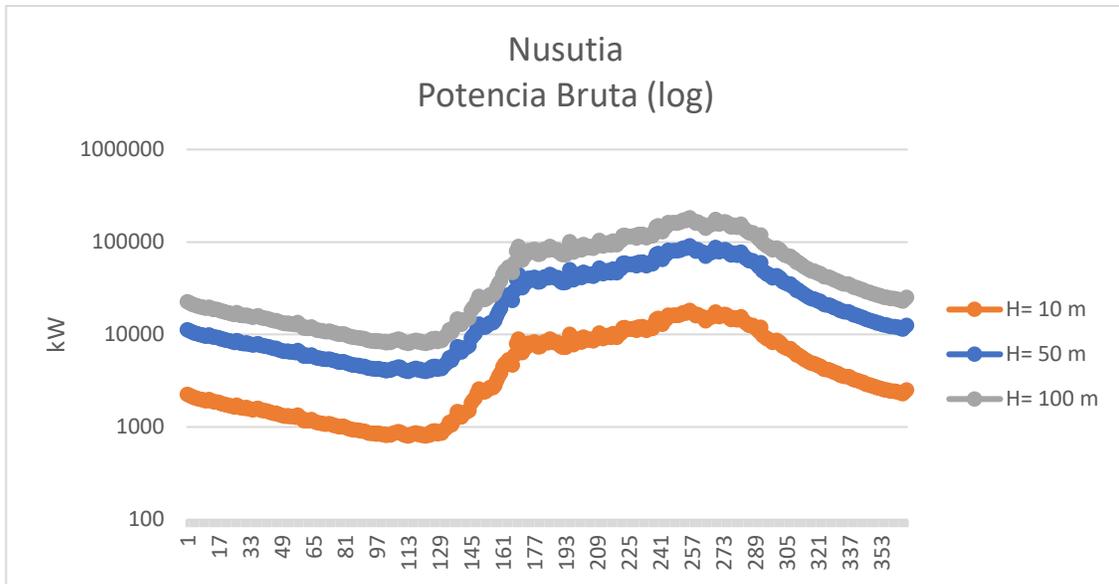


Figura 86. Potencia diaria promedio o bruta de la estación Nusutia.

El comportamiento de la potencia cuando se restan los caudales bajos mensuales se muestra en la tabla 6 y la figura 87; a, b y c, correspondientes a los tres escenarios de carga. Los valores de potencia iguales a cero se establecieron cuando el caudal promedio diario era menor al caudal bajo mensual. De esta manera, en la estación Nusutia se presentaron 121 días con esta condición, es decir con potencia cero.

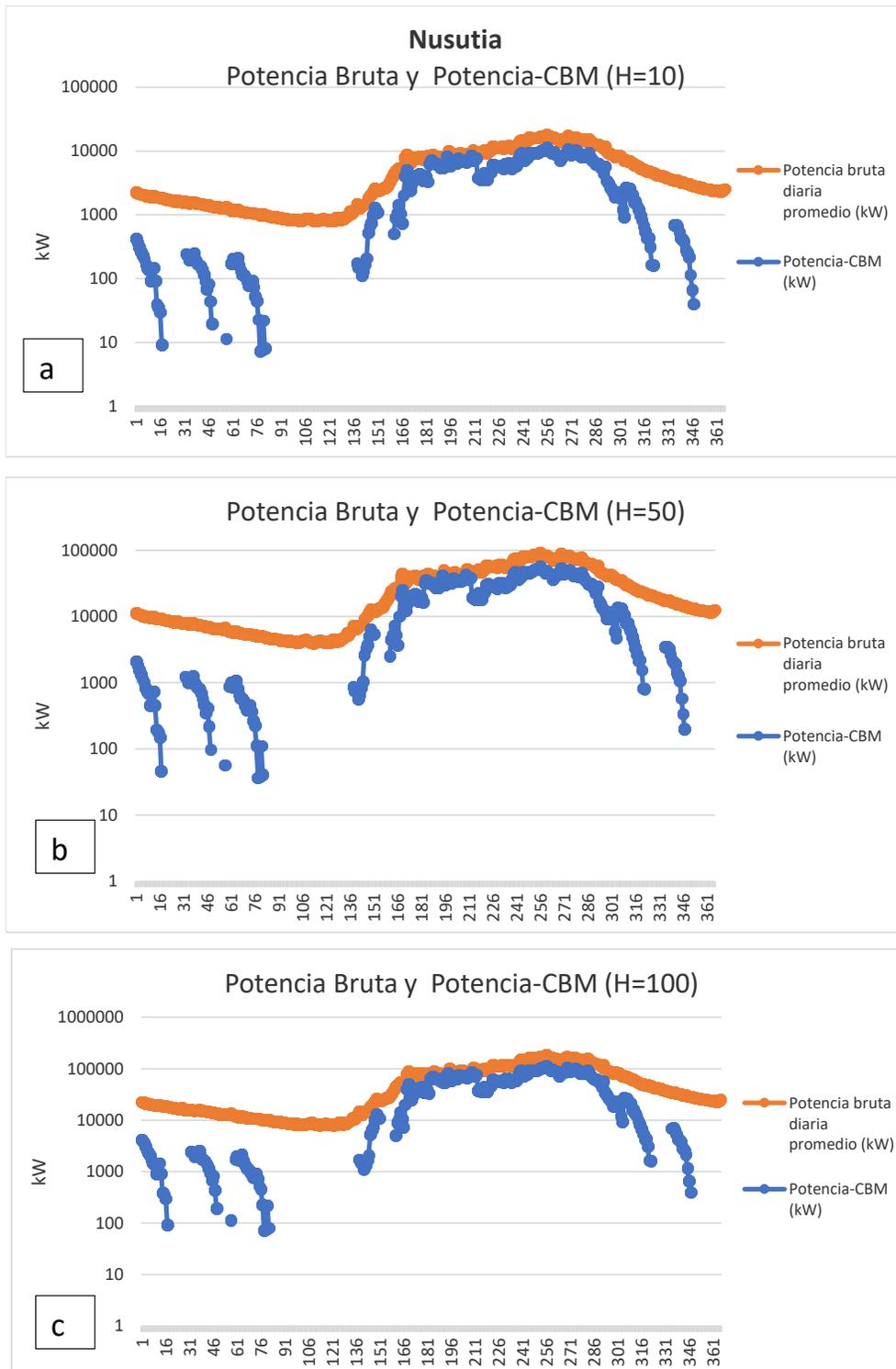


Figura 87. Potencia bruta y potencia menos Caudal Bajo Mensual (CBM) para cada escenario de carga de la estación Nusutia.

8.3.11 Estación hidrométrica Ixtayutla.

La estación Ixtayutla se encuentra sobre el cauce del río Verde que es de orden 8 (Mapa 2), 11 km aguas abajo de la estación Yutacua, 8.5 km aguas abajo de la confluencia del río Putla con el río Verde y 8 km aguas arriba de la confluencia entre los ríos Atoyac y Verde (Mapa 4). En la base de datos BANDAS tiene asignado el número 20021, cuenta con 34 años de registro entre 1961 y 2015, con excepción de 1986, 2011 y el periodo entre 1992 y 2010. Se encuentra a 317 msnm (Figura 88), en una sección del río perteneciente a la subcuenta del alto río Verde o Yalestán, no presenta días con caudal cero y tiene un caudal anual promedio de 106 m³/s (Tabla 3, Figura 38).

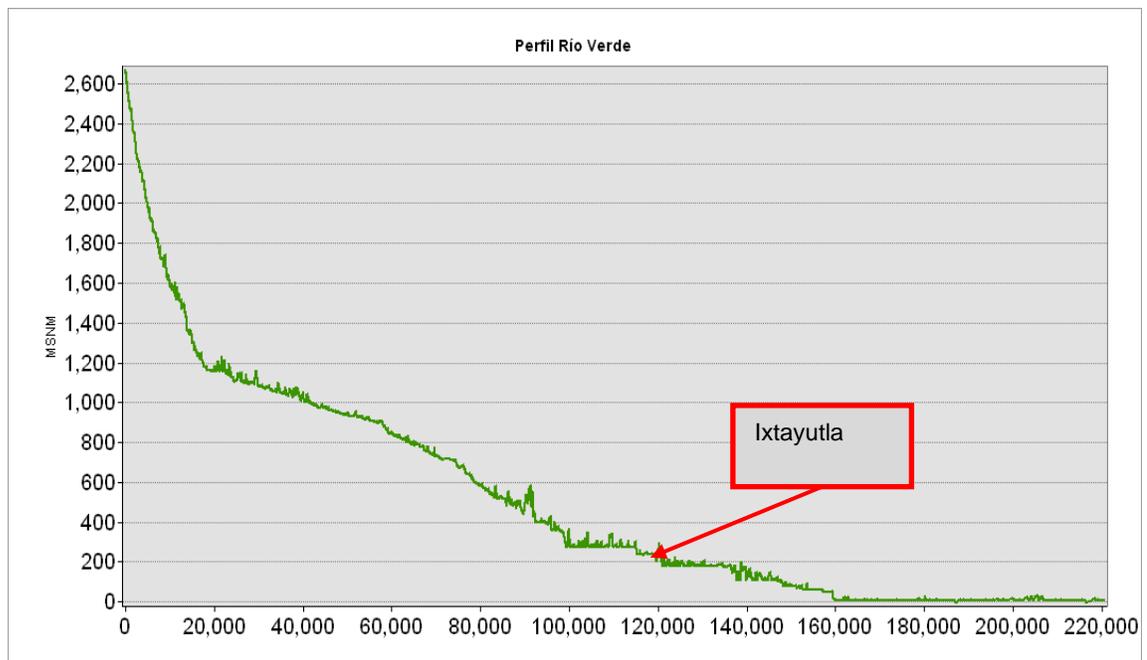


Figura 88. Localización de la estación Ixtayutla en el perfil del río Verde.

La curva de duración de caudales de la estación Ixtayutla indica que existe un 95% de probabilidad de excedencia para 18 m³/s, mientras que la probabilidad de alcanzar 60

m³/s es del 50%, la probabilidad de alcanzar o exceder 100 m³/s es del 35%. Mientras que la probabilidad de alcanzar 10 m³/s es mayor al 99% (Figura 89).

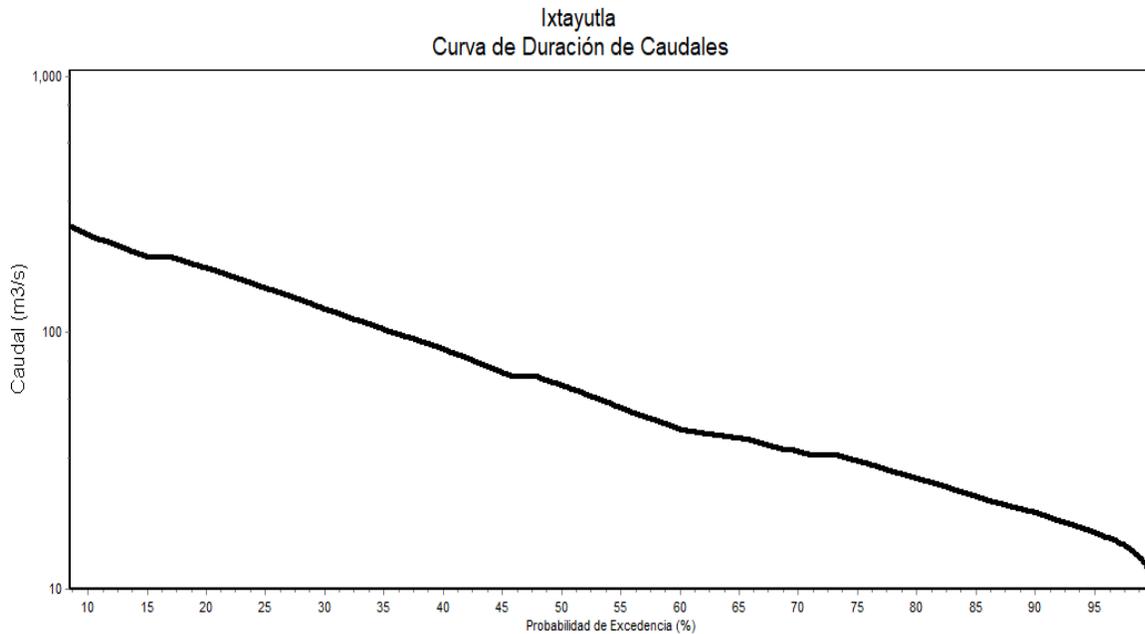


Figura 89. Curva de duración de caudales de la estación Ixtayutla.

Los caudales extremadamente bajos muestran valores de entre 10 y 19 m³/s, con la mayoría de los registros entre 15 y 17.5 m³/s. Estos caudales tienen una duración de entre 1 y 37 días, aunque generalmente no sobrepasan los 12 días. En cuanto a la frecuencia anual de ocurrencia, esta oscila entre uno y nueve episodios al año (Figura 90).

Los caudales diarios promedio oscilan entre los 294.18 y 25.30 m³/s en septiembre y marzo respectivamente. El periodo de caudales menores a 100 m³/s comienza en noviembre y termina en junio, presentando los menores valores en abril. Es importante señalar que incluso durante el periodo de menor caudal, estos son superiores a los 25 m³/s (Figura 91).

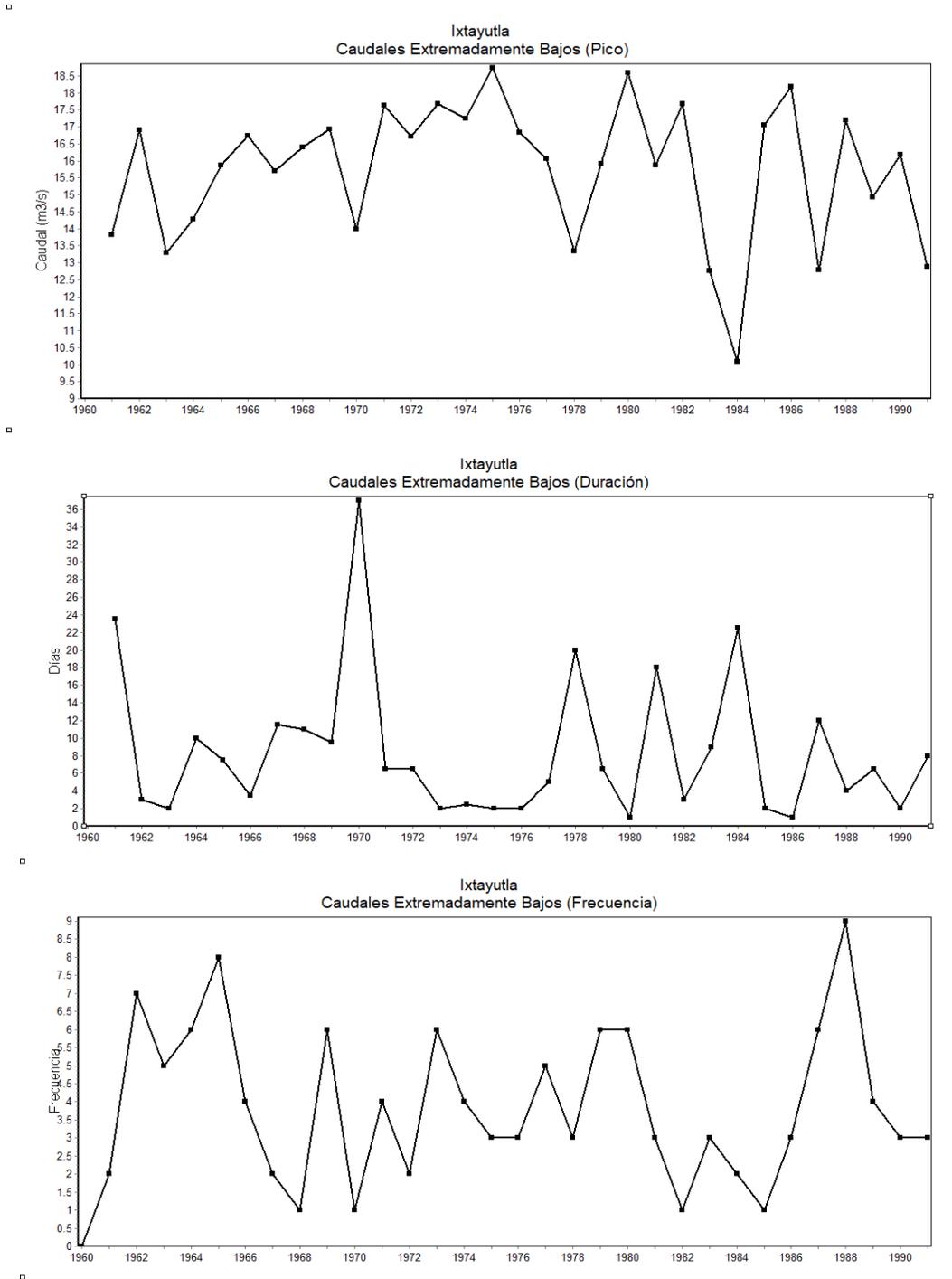


Figura 90. Caudales extremadamente bajos para la estación Ixtayutla. Gráficas de Caudal extremadamente bajo, duración y frecuencia.

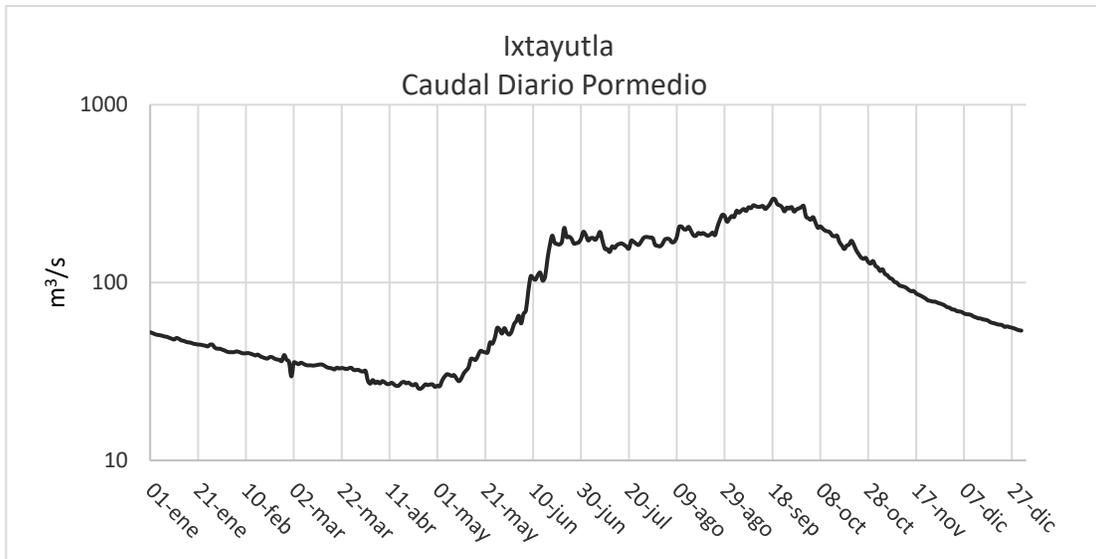


Figura 91. Caudal diario promedio de la estación Ixtayutla.

Por su parte, los caudales bajos mensuales se encuentran entre 22.72 y 129.9 m³/s, siendo el mes de marzo el de menor caudal bajo mensual. Este componente del caudal ambiental muestra que es de enero a mayo cuando se presentan las condiciones más secas (Figura 92).

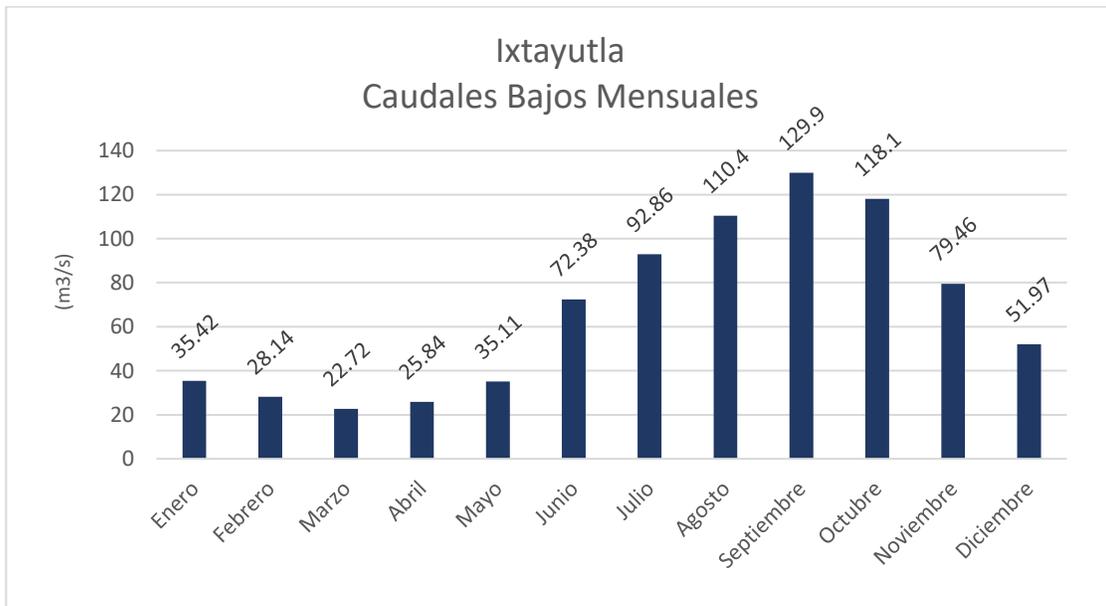


Figura 92. Caudales bajos mensuales para la estación Ixtayutla.

La curva de duración de caudales obtenida al restar los caudales bajos mensuales a los caudales diarios promedio indica que la probabilidad de tener caudal disponible es de 91% con un valor de 0.7 m³/s, un 90% de probabilidad de exceder 1.2 m³/s, un 50% de probabilidad de alcanzar o exceder 13.8 m³/s y un 10% de probabilidad de exceder 110 m³/s (Figura 93).

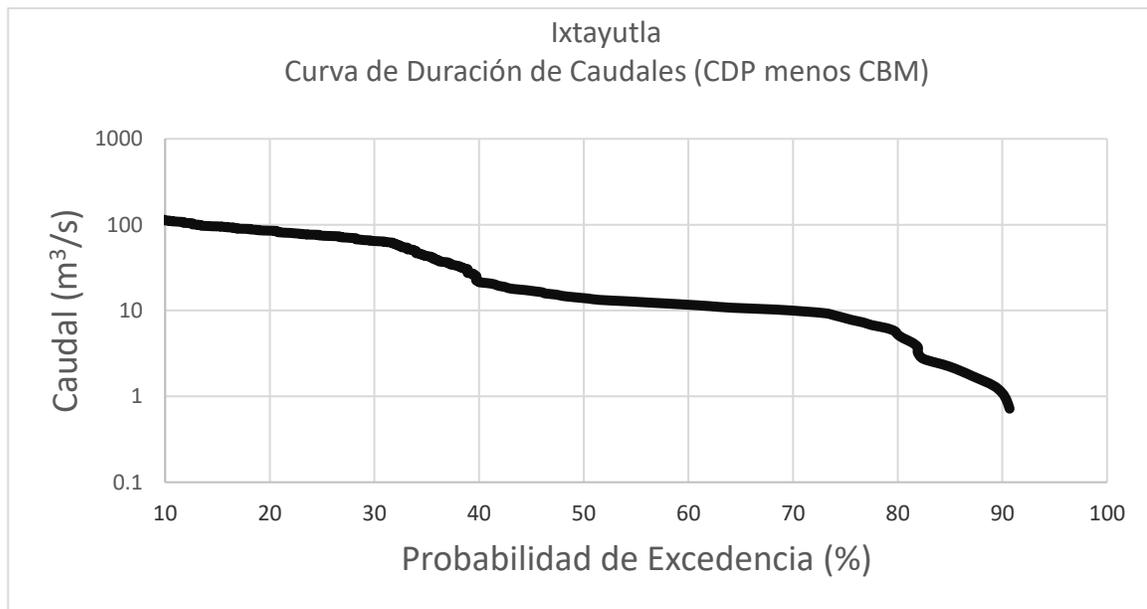


Figura 93. Curva de duración de caudales de la estación Ixtayutla restando el caudal bajo mensual al caudal diario promedio.

A partir de los caudales diarios promedio se calculó la potencia diaria promedio, utilizando los tres escenarios de carga establecidos a partir del análisis de la topografía (H=10, 50 y 100 m) (Tabla 7 y figura 94). Los valores más altos, en el escenario de 100 m de carga alcanzan los 245,309 kW, mientras que los mínimos con carga de 10 m llegan a 2,109 kW.

Tabla 7. Máximos y mínimos de potencial bruto de la estación Ixtayutla.

Potencia diaria promedio (kW) y Potencia menos CBM				
Potencia	Máximos/Mínimos	Carga		
		H= 10 m	H= 50 m	H= 100 m
Potencia diaria promedio (kW)	Máximos	24,530.92343	122,654.6172	245,309.2343
	Mínimos	2,109.925764	10,549.62882	21,099.25764
Potencia menos CBM (kW)	Máximos	13,699.21193	68,496.05966	136,992.1193
	Mínimos	6.626913158	33.13456579	66.26913158

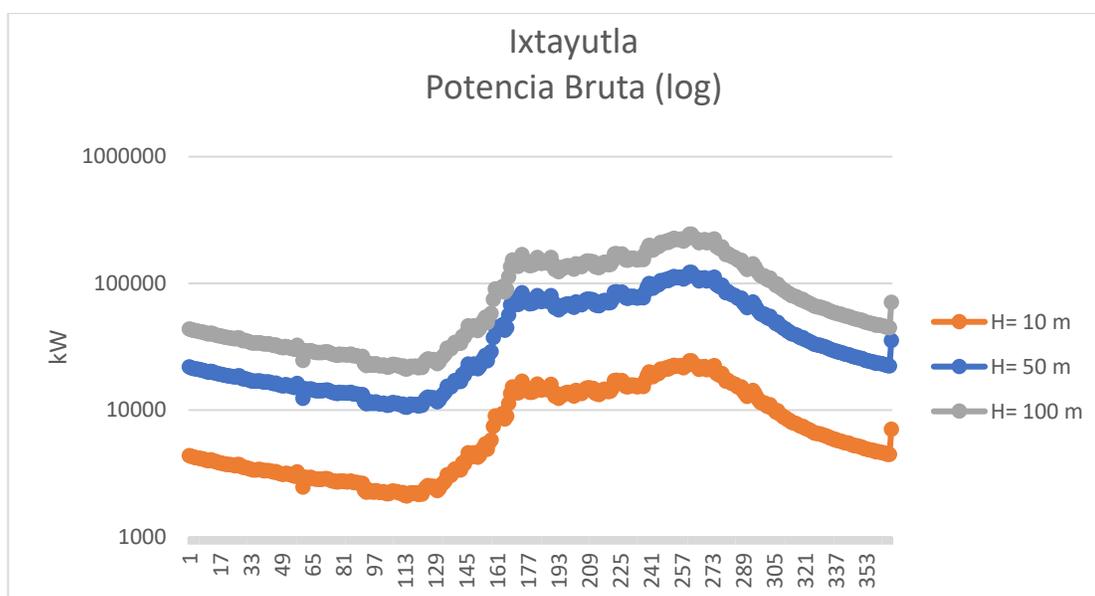


Figura 94. Potencia diaria promedio o bruta de la estación Ixtayutla.

Se calculó el comportamiento de la potencia diario promedio restando los Caudales Bajos Mensuales (CBM), cuando los caudales diarios promedio eran menores que el CBM para ese mes se contabilizó como potencia cero. De esta manera, la estación Ixtayutla presentó 32 días con potencia cero. En la figura 95 se muestra las diferentes potencias para cada escenario de carga, con el caudal diario promedio y con el caudal diario promedio menos el CBM.

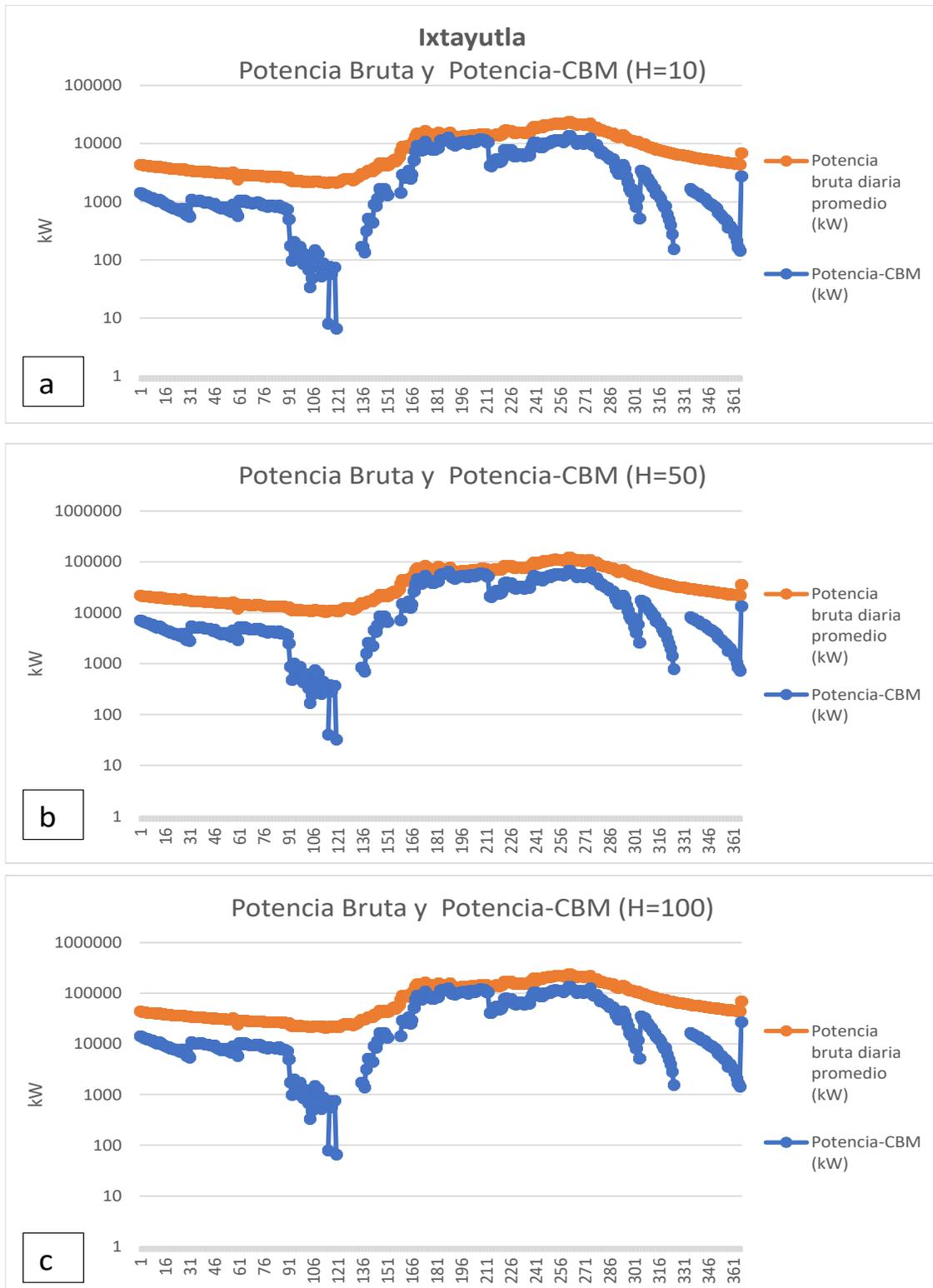


Figura 95. Potencia bruta y potencia menos Caudal Bajo Mensual (CBM) para cada escenario de carga de la estación Ixtayutla.

8.3.12 Estación hidrométrica El Carrizo

La estación El Carrizo se encuentra en la vertiente oeste de la cuenca sobre el río Verde, el cual es de orden ocho (Mapa 2), en la subcuenca del bajo río Verde o Paso de la Reina, que es la última subcuenca antes de la desembocadura del río Verde al océano Pacífico. La estación es la primera después de las confluencias de los ríos Verde y Atoyac, se encuentra 18 km aguas abajo de dicha confluencia y 26 km aguas abajo de la estación Ixtayutla (Mapa 2). En la base de datos BANDAS tiene el número 20043. Se encuentra a 222 msnm (Figura 96) y ha registrado datos de un periodo de 32 años, entre 1969 y 2002, con la excepción del año 2001 (Tabla 2). La estación no contabiliza días con caudal cero y tiene un caudal anual promedio de 155.2 m³/s (Tabla 3, Figura 38).

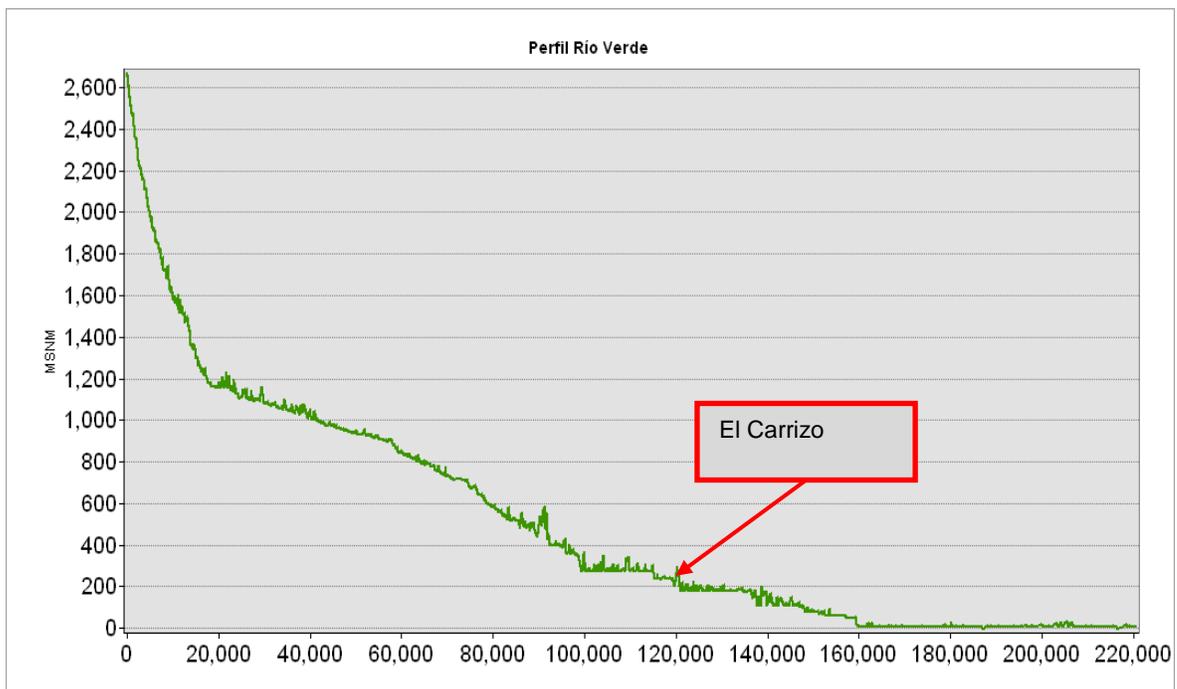


Figura 96. Localización de la estación El Carrizo en el perfil del río Verde.

La curva de duración de caudales en la estación El Carrizo indica que una probabilidad del 95% de alcanzar o superar los 20 m³/s, mientras que la probabilidad de alcanzar 75 m³/s es del 50%, por su parte la probabilidad de alcanzar 100 m³/s es del 42%. Por su parte, la probabilidad de alcanzar o superar 10 m³/s es mayor al 99% (Figura 97).

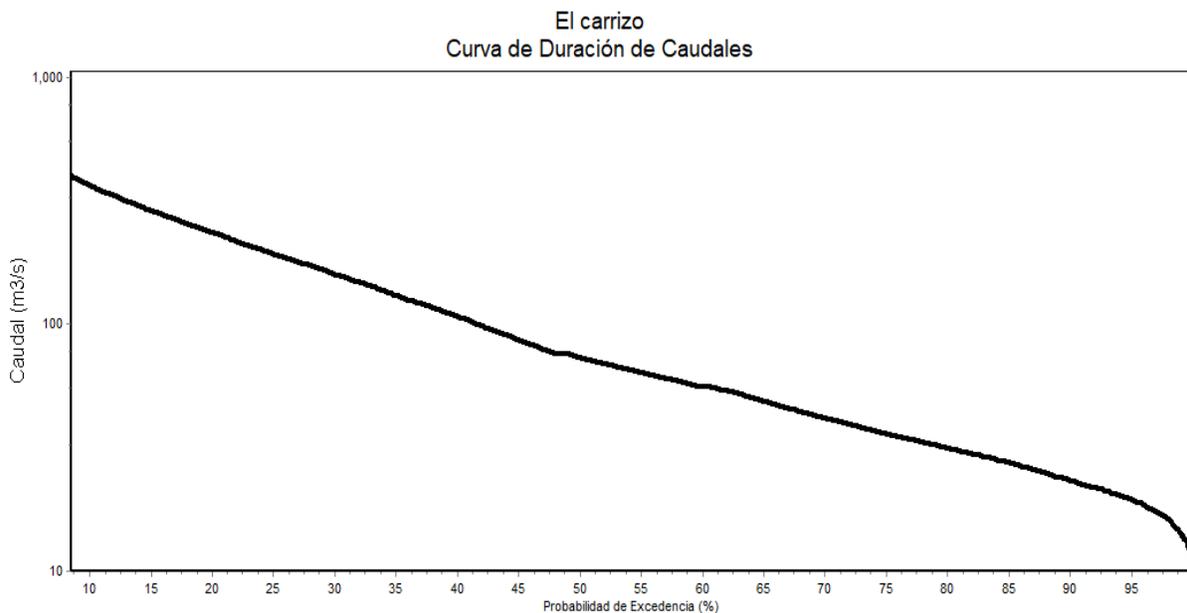


Figura 97. Curva de duración de caudales de la estación El Carrizo.

Los caudales extremadamente bajos para la estación El Carrizo indican valores que van de 11 a los 23 m³/s, con una duración máxima de 32 días y mínimo de 1 día, aunque generalmente dura entre 3 y 15 días. La frecuencia anual en la que ocurren estos caudales es de entre 1 a 6 episodios al año, aunque por lo general ocurren entre 1 a 4 episodios (Figura 98).

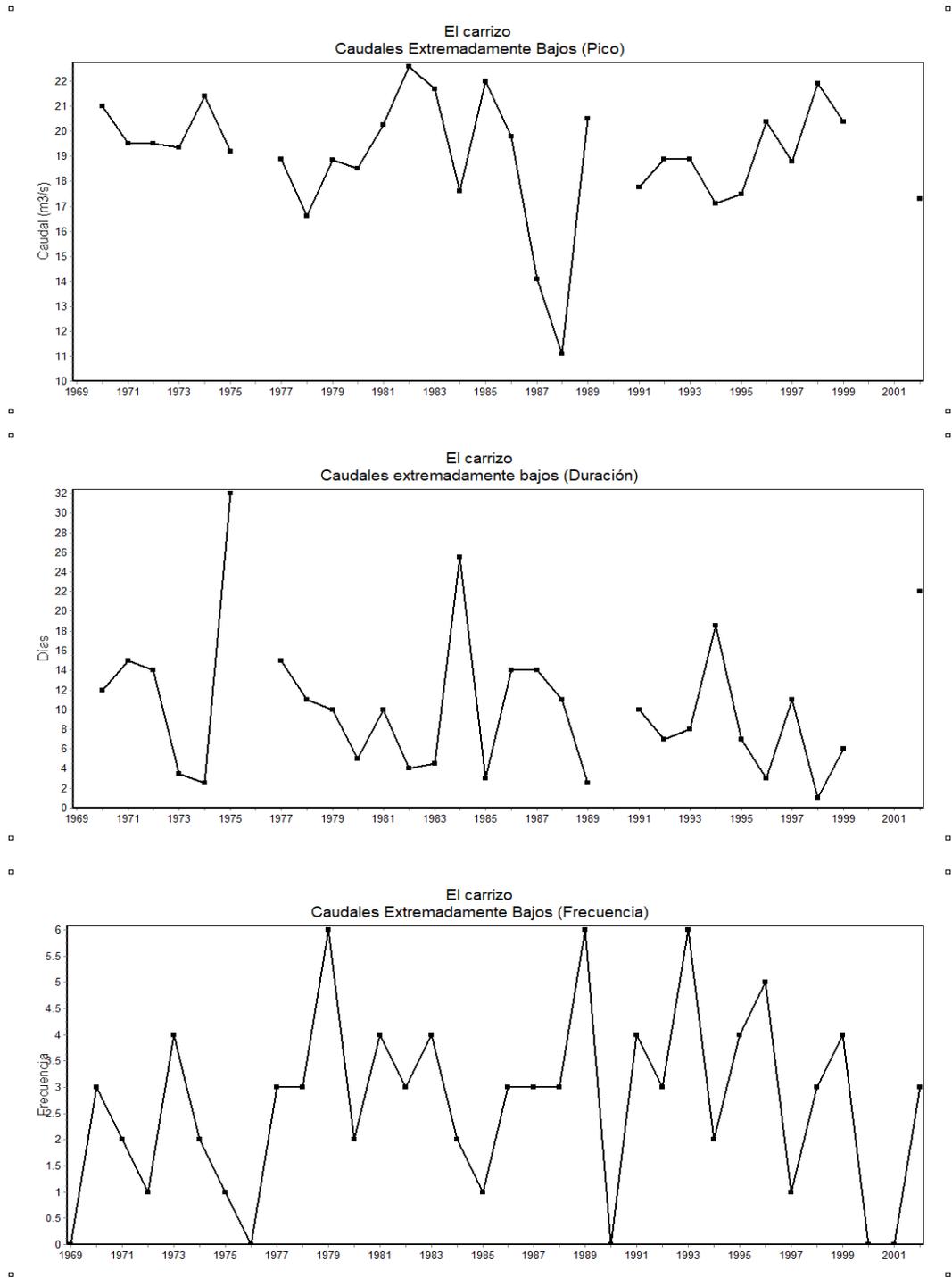


Figura 98. Caudales extremadamente bajos para la estación El Carrizo. Gráficas de caudal extremadamente bajo, duración y frecuencia.

La estación El Carrizo presentó caudales diarios promedios entre 25.05 m³/s en el mes de marzo y 487.96 m³/s en octubre. Siendo entre mediados de noviembre y principios de junio cuando la estación presenta valores por debajo de 100 m³/s, los valores más bajos en abril con un promedio mínimo de 25 m³/s y un incremento muy marcado a partir de mayo (Figura 99).

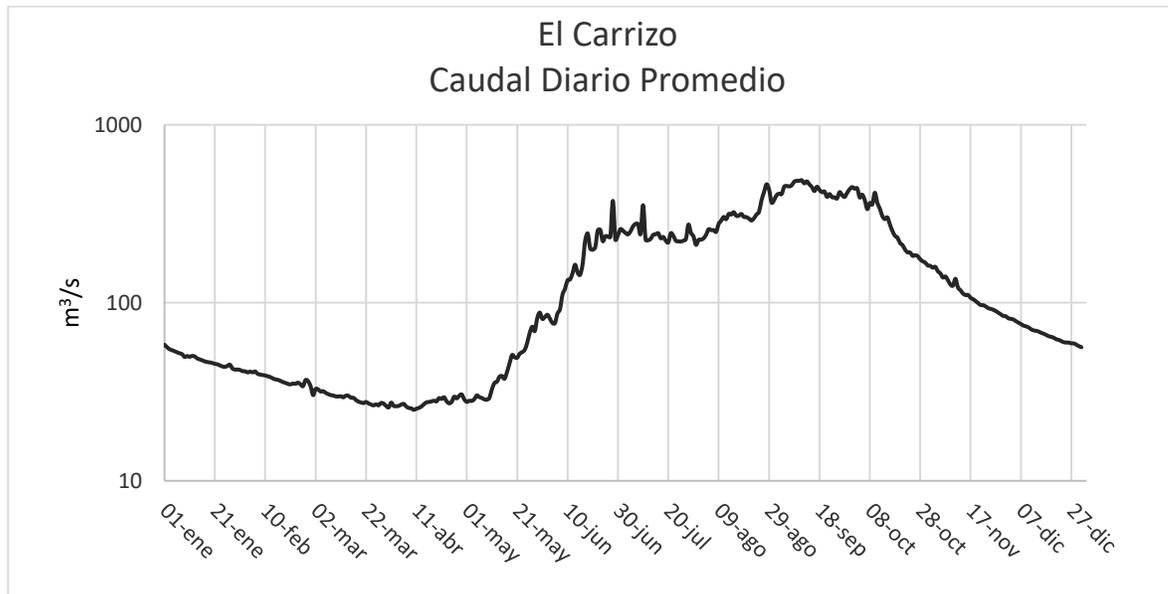


Figura 99. Caudal diario promedio de la estación El Carrizo.

Los Caudales Bajos Mensuales (CBM) muestran valores entre 28 y 162.5 m³/s, siendo el mes de marzo el de menor valor de CBM y el periodo entre enero a mayo el que presenta los menores valores de CBM (Figura 100).

La curva de duración de caudales producto de la resta de los caudales bajos mensuales a los caudales diarios promedio muestra que existe una probabilidad del 50% de alcanzar o exceder 8.8 m³/s, una probabilidad del 28% de exceder los 100 m³/s, la probabilidad de tener caudal disponible es 70%, con un valor de 1.1 m³/s, el 30% restante no habrá caudal disponible (Figura 101).

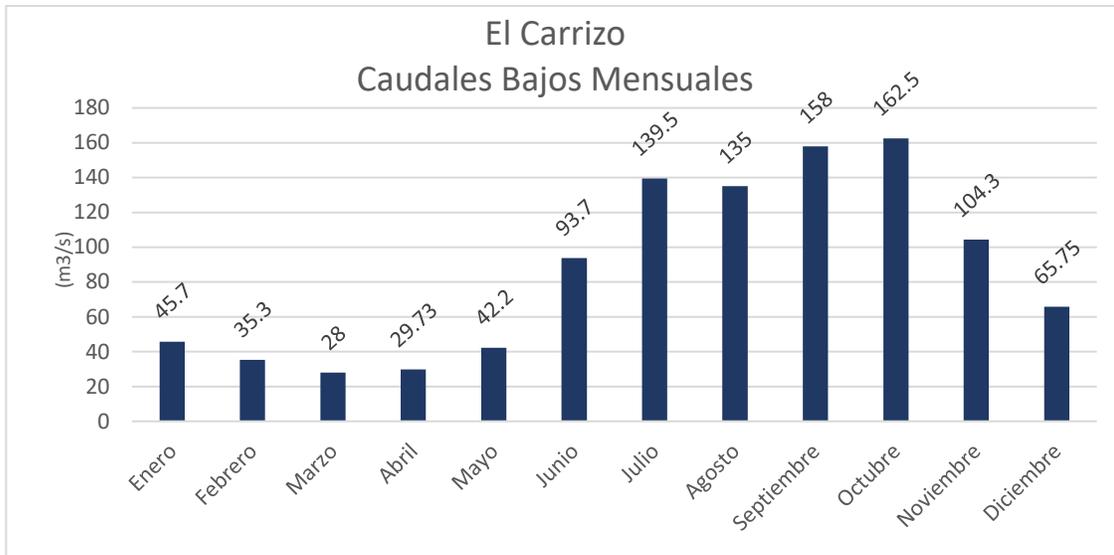


Figura 100. Caudales Bajos Mensuales de la estación El Carrizo.

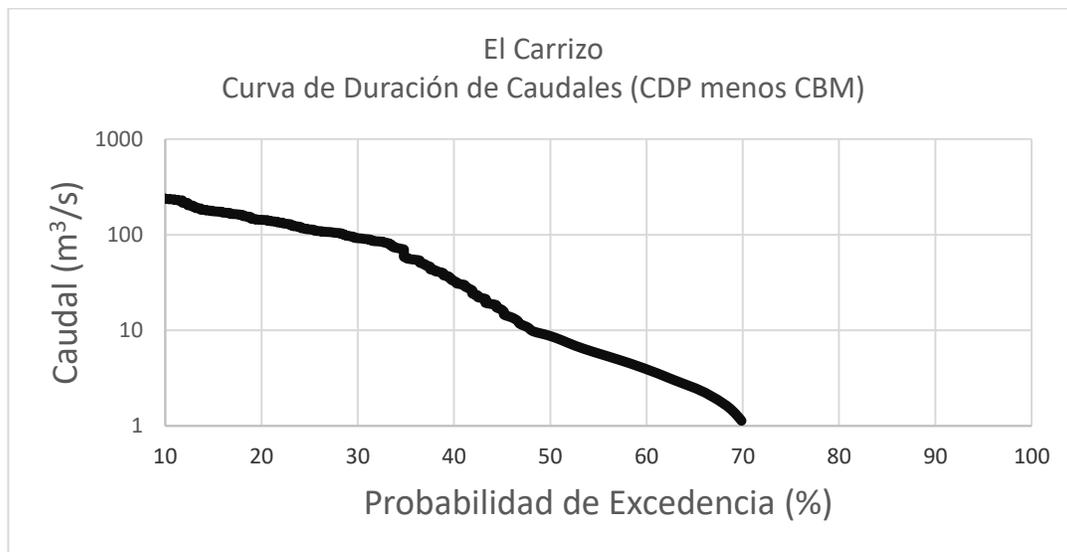


Figura 101. Curva de duración de caudales de la estación El Carrizo restando el caudal bajo mensual al caudal diario promedio.

A partir de los datos de caudales diarios promedio se realizó el cálculo del potencial diario promedio, en tres escenarios de carga con H=10, 50 y 100 m (Tabla 8, Figura 102). Los valores van desde el mínimo de 2,089 kW para 10 m de carga hasta 406,891 kW para 100 m de carga.

Tabla 8. Máximos y mínimos de potencial bruto de la estación El Carrizo.

Potencia diaria promedio (kW) y Potencia menos CBM				
Potencia	Máximos/Mínimos	Carga		
		H= 10 m	H= 50 m	H= 100 m
Potencia diaria promedio (kW)	Máximos	40,689.15773	203,445.7886	406,891.5773
	Mínimos	2,089.3338	10,446.669	20,893.338
Potencia menos CBM (kW)	Máximos	27,514.32773	137,571.6386	275,143.2773
	Mínimos	25.3098	126.549	253.098

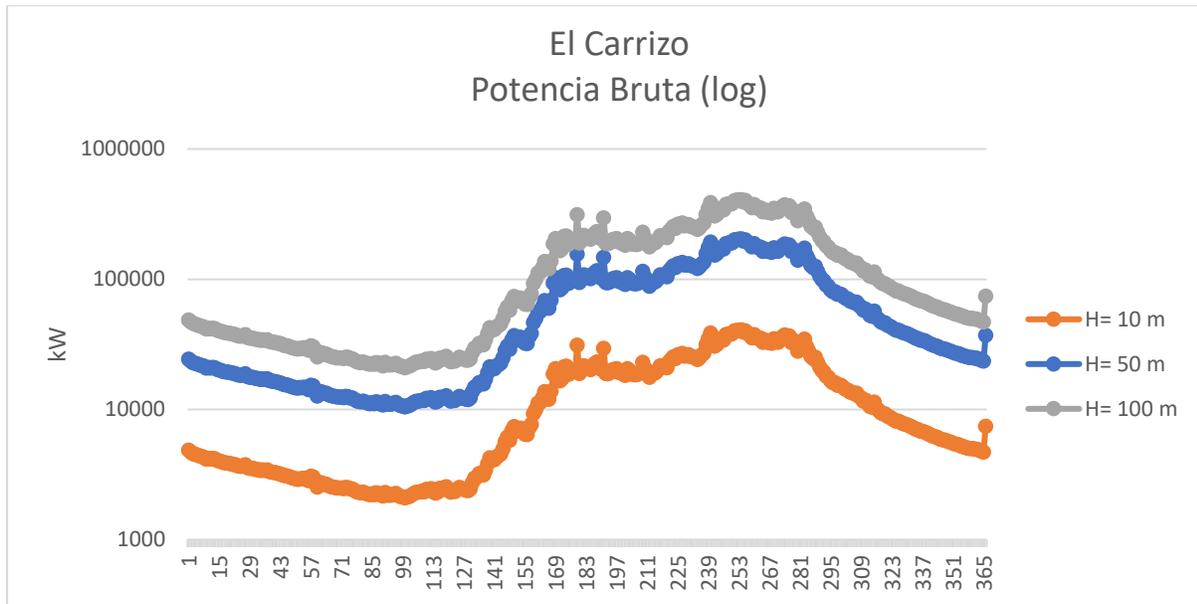


Figura 102. Potencia diaria promedio o bruta de la estación El Carrizo.

Posteriormente, se calculó la potencia restando los CBM, como componente clave del caudal ecológico, al caudal diario promedio. Los días con resultados negativos se contabilizaron como potencia cero. De esta manera la estación el carrizo presentó 79 días con potencia cero (Figura 103; a, b, c).

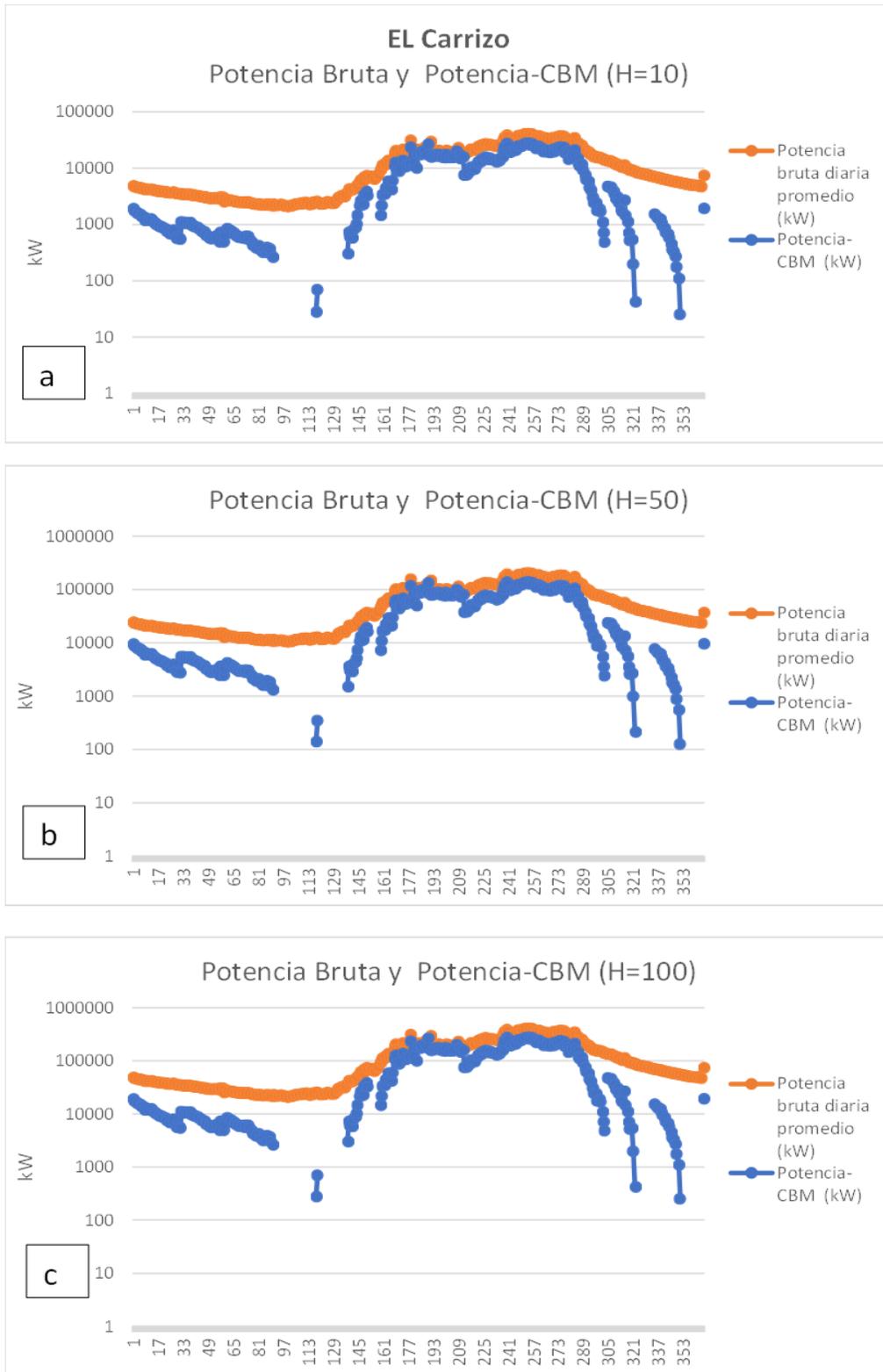


Figura 103. Potencia diaria promedio y potencia menos Caudal Bajo Mensual para cada escenario de carga de la estación El Carrizo.

8.3.13 Estación hidrométrica Paso de la Reina

La estación Paso de la Reina se encuentra en la subcuenca baja del río Verde, sobre el cauce del mismo río Verde, el cual es un río de orden ocho (Mapa 2). En la base de datos BANDAS esta estación tiene el número 20017. Se localiza 30 km aguas abajo de la estación El Carrizo, 3.5 km aguas arriba de confluencia del río Leche con el río Verde y 57 km aguas arriba de la desembocadura del río Verde al océano Pacífico (Mapa 4). La estación es la última de la cuenca y se encuentra a 49 msnm (Figura 104), cuenta con 25 años de registros entre 1960 a 1987 y registros incompletos de los años 1986 y 1987 (Tabla 2). No presenta días con caudal cero y tiene un caudal anual promedio de 162.7 m³/s (Tabla 3, Figura 38). En el sitio de la estación hidrométrica Paso de la Reina, la CFE realizó la planeación del proyecto “Aprovechamiento Hidráulico de Usos Múltiples Paso de la Reina, Oaxaca”, el cual fue cancelado de forma definitiva en el año 2021.

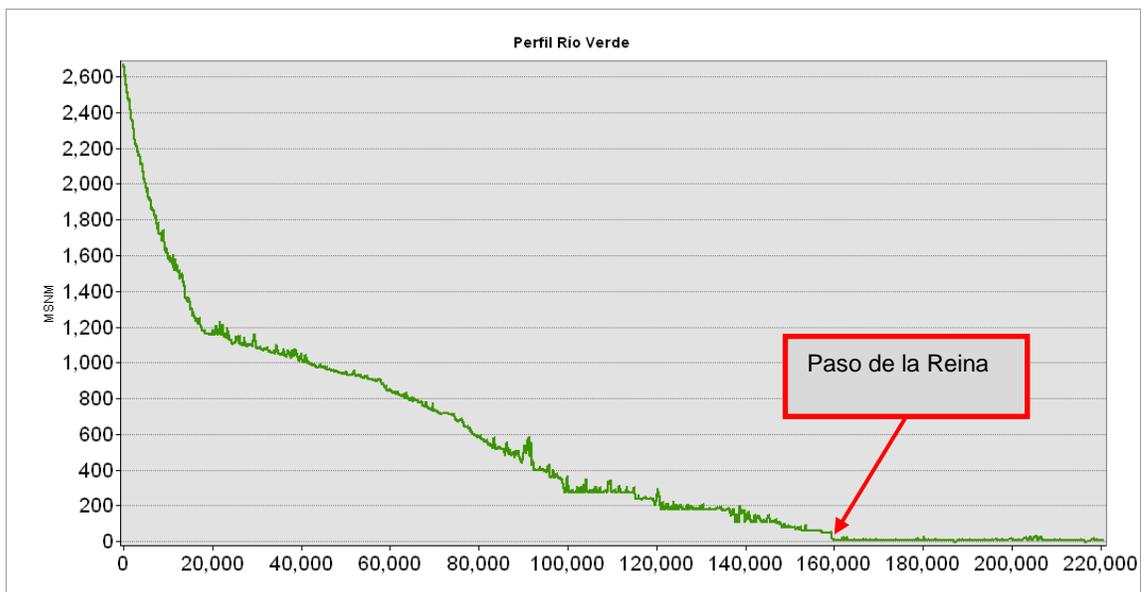


Figura 104. Localización de la estación Paso de la Reina en el perfil del río Verde.

La curva de duración de caudales de la estación Paso de la Reina presenta una probabilidad del 95% de alcanzar o superar los 23 m³/s, una probabilidad del 50% de alcanzar los 85 m³/s y una probabilidad de 47% para un caudal de 100 m³/s. La probabilidad de alcanzar o superar 10 m³/s es mayor al 99% (Figura 105).

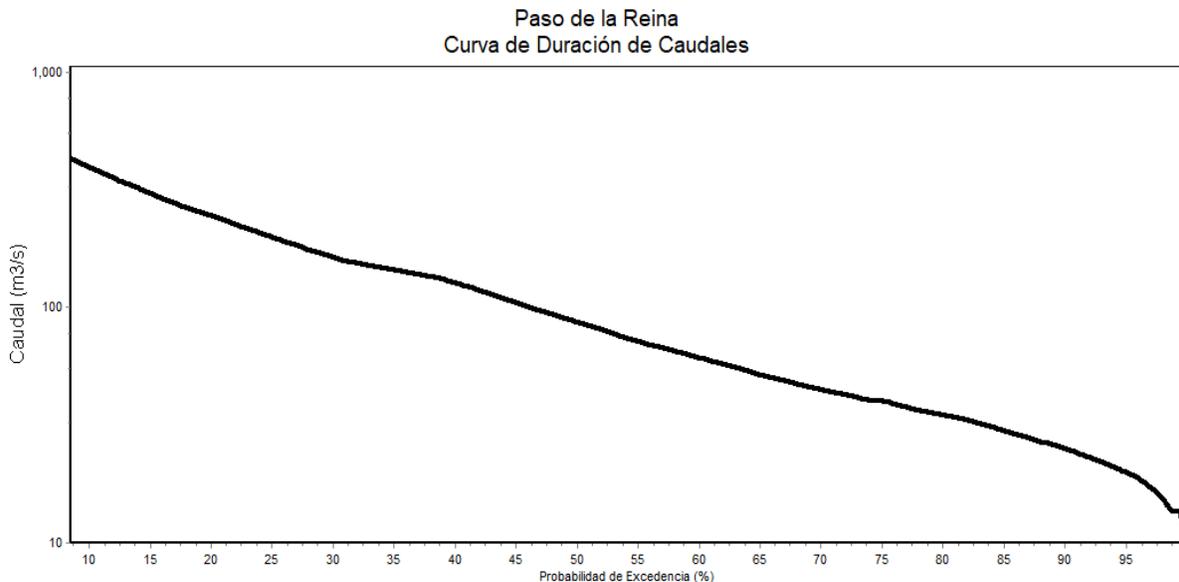


Figura 105. Curva de Duración de Caudal de la estación Paso de la Reina.

Los caudales extremadamente bajos de la estación Paso de la Reina oscilan entre los 13.5 y los 25 m³/s, con una duración máxima de 46 días, ocurrida solo en el año 1984, el resto de los años la duración ocurre entre uno y 32 días y por lo general entre dos y nueve días. La frecuencia anual de ocurrencia es de entre uno a seis episodios de caudales extremadamente bajos al año, aunque generalmente ocurren entre dos y cuatro episodios (Figura 106).

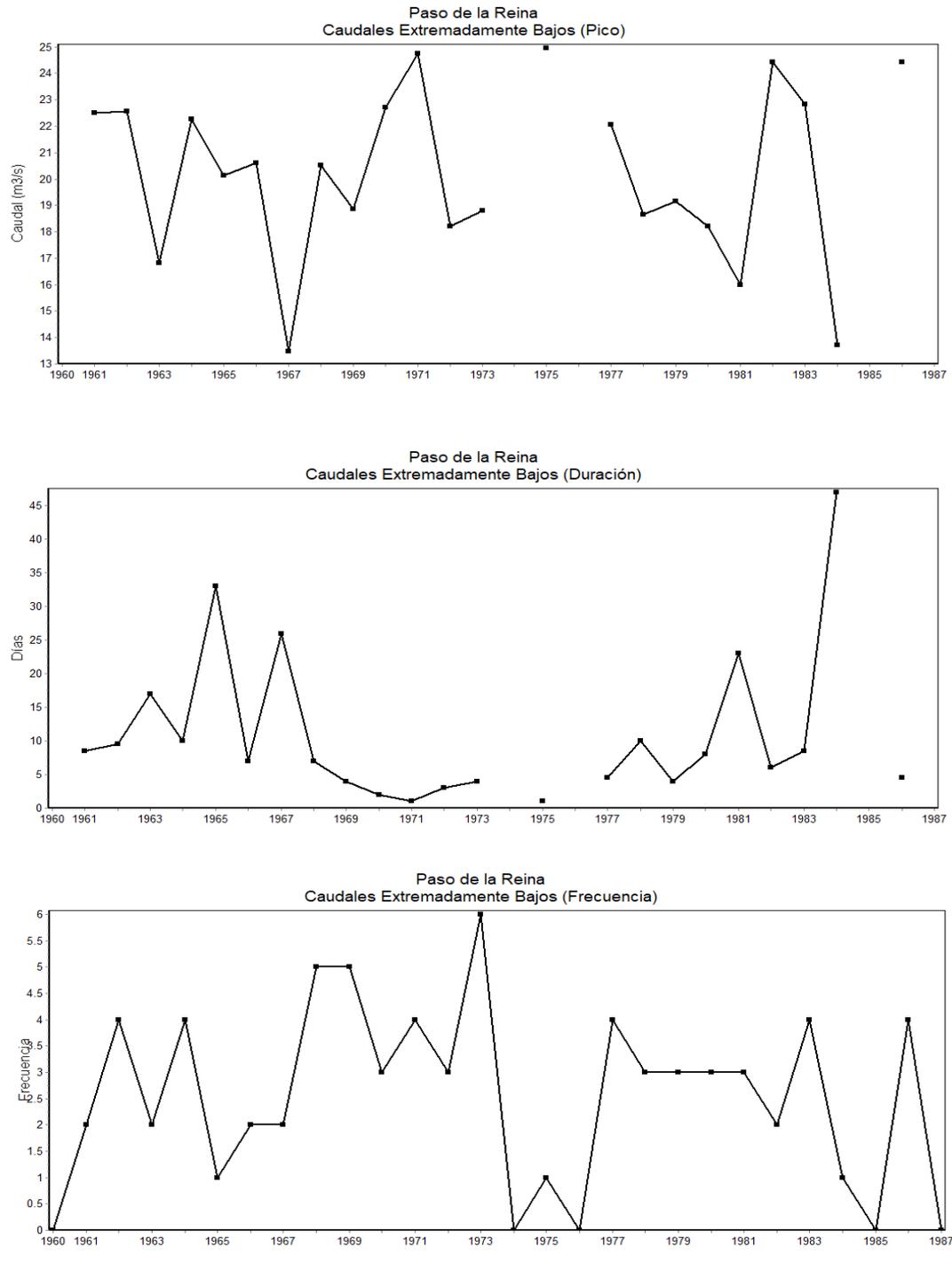


Figura 106. Caudales extremadamente bajos para la estación Paso de la Reina. Gráficas de caudal extremadamente bajo, duración y frecuencia.

Los caudales diarios promedio de la estación Paso de la Reina son los más altos de toda la cuenca, se encuentran ente los 29.14 m³/s en el mes de marzo y 550.2 m³/s en septiembre. Desde la tercera semana de noviembre hasta inicios de junio, los caudales diarios promedio se mantienen por debajo de 100 m³/s, aunque en ningún momento es menor a 29 m³/s (Figura 107).

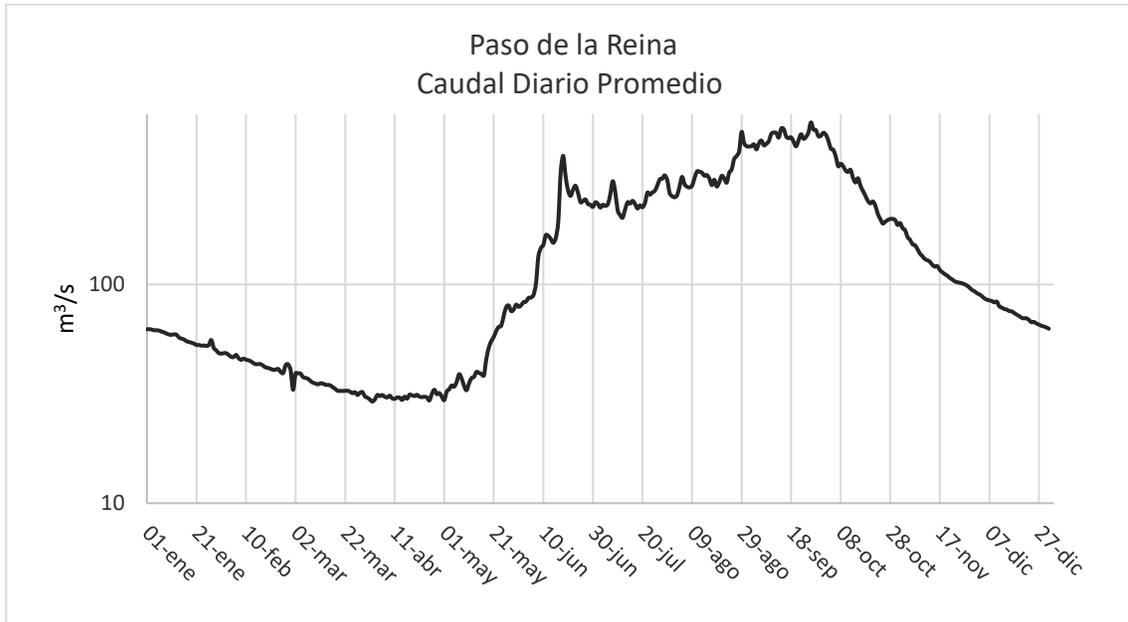


Figura 107. Caudal diario promedio de la estación Paso de la Reina.

Por su parte los Caudales Bajos Mensuales (CBM) oscilan entre 31.75 m³/s y 173 m³/s. Siendo el mes de marzo el de menor CBM y septiembre el de mayor CBM. El periodo con menores valores de CBM fue entre los meses de enero a mayo (Figura 108).

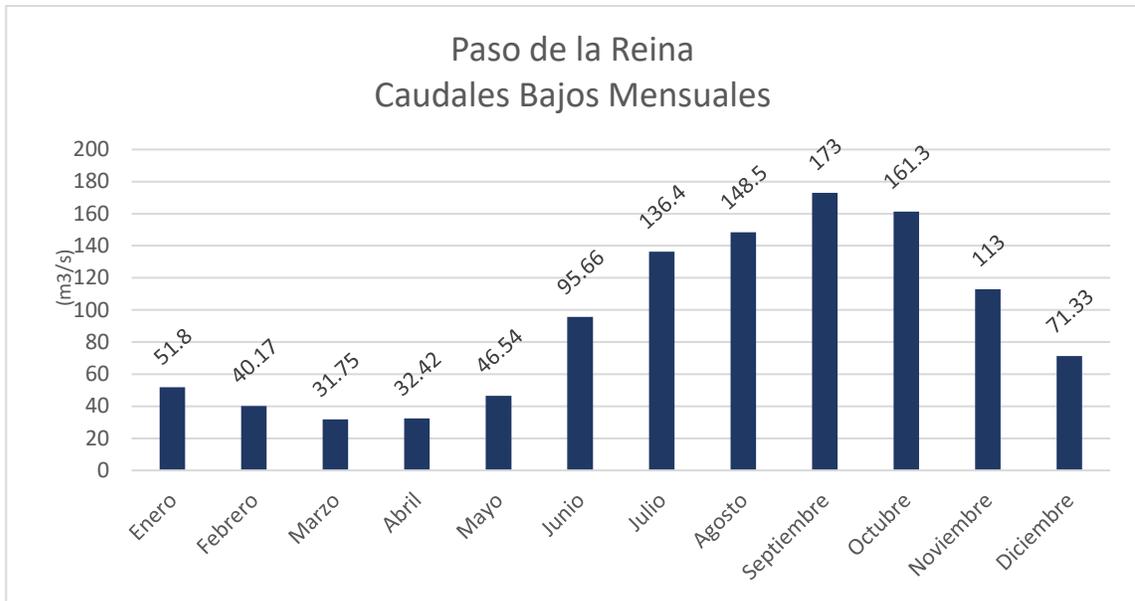


Figura 108. Caudales bajos mensuales de la estación Paso de la Reina.

La curva de duración de caudales obtenida de la resta de los caudales bajos mensuales a los caudales diarios promedio muestra que la probabilidad de tener caudal disponible es solo del 73%, con valor de caudal de 1.8 m³/s. Por otra parte, existe una probabilidad del 50 % alcanzar o exceder 11.6 m³/s y un 30% de exceder los 98 m³/s y un 10% de exceder 254 m³/s (Figura 109).

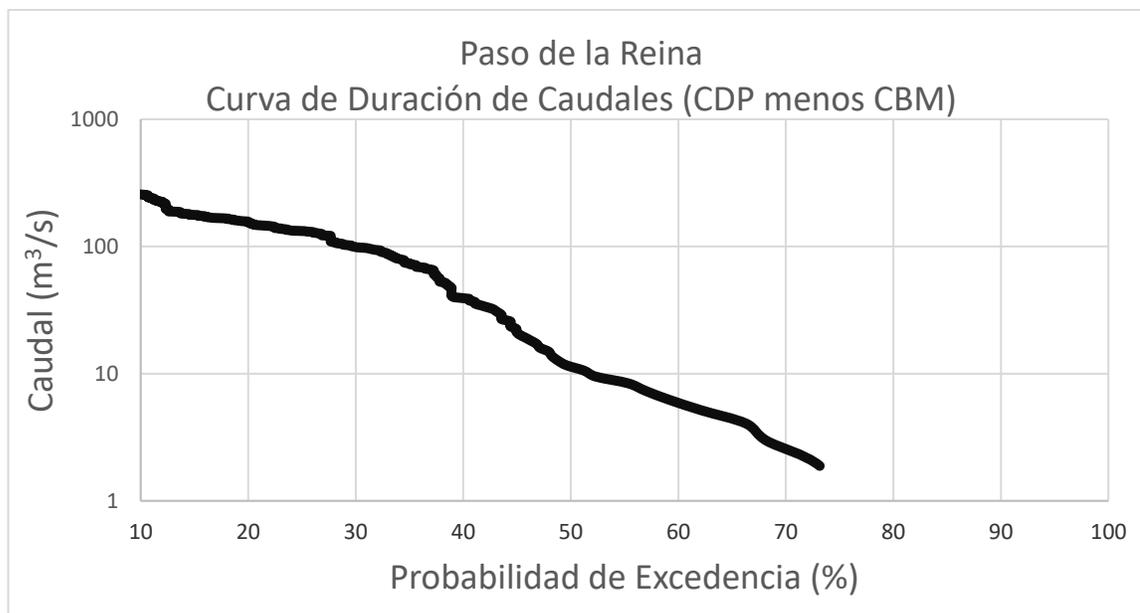


Figura 109. Curva de duración de caudales de la estación Paso de la Reina restando el caudal bajo mensual al caudal diario promedio.

La potencia diaria se calculó utilizando los valores de caudal diario promedio y en tres escenarios de carga tres cargas, 10, 50 y 100 m (Tabla 9, Figura 110). Los valores máximos obtenidos en el escenario de 100 m de carga son de 458,852 kW, mientras que en el escenario de 10 m de carga el valor mínimo obtenido es de 2,430 kW como potencia diaria promedio.

Tabla 9. Máximos y mínimos de potencial bruto de la estación Paso de la Reina.

Potencia diaria promedio (kW) y Potencia menos CBM				
Potencia	Máximos/Mínimos	Carga		
		H= 10 m	H= 50 m	H= 100 m
Potencia diaria promedio (kW)	Máximos	45,885.27648	229,426.3824	458,852.7648
	Mínimos	2,430.285605	12,151.42803	24,302.85605
Potencia menos CBM (kW)	Máximos	31,459.67148	157,298.3574	314,596.7148
	Mínimos	6.4623375	32.3116875	64.623375

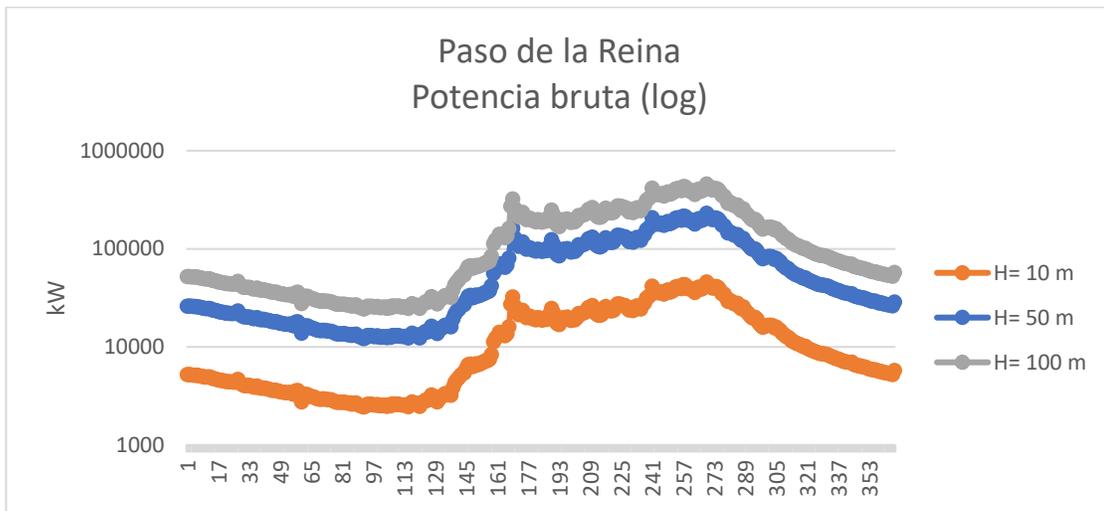


Figura 110. Potencia diaria promedio o bruta de la estación Paso de la Reina

Se recalculó la potencia restando los valores de Caudales Bajos Mensuales a los valores diarios promedio de caudal, de esta manera, los días con menor caudal diario promedio que CBM, es decir con valores negativos, se establecieron como días con potencia cero. De esta manera, la estación Paso de la Reina presentó un total de 87 días bajo esta condición (Tabla 9, Figura 111).

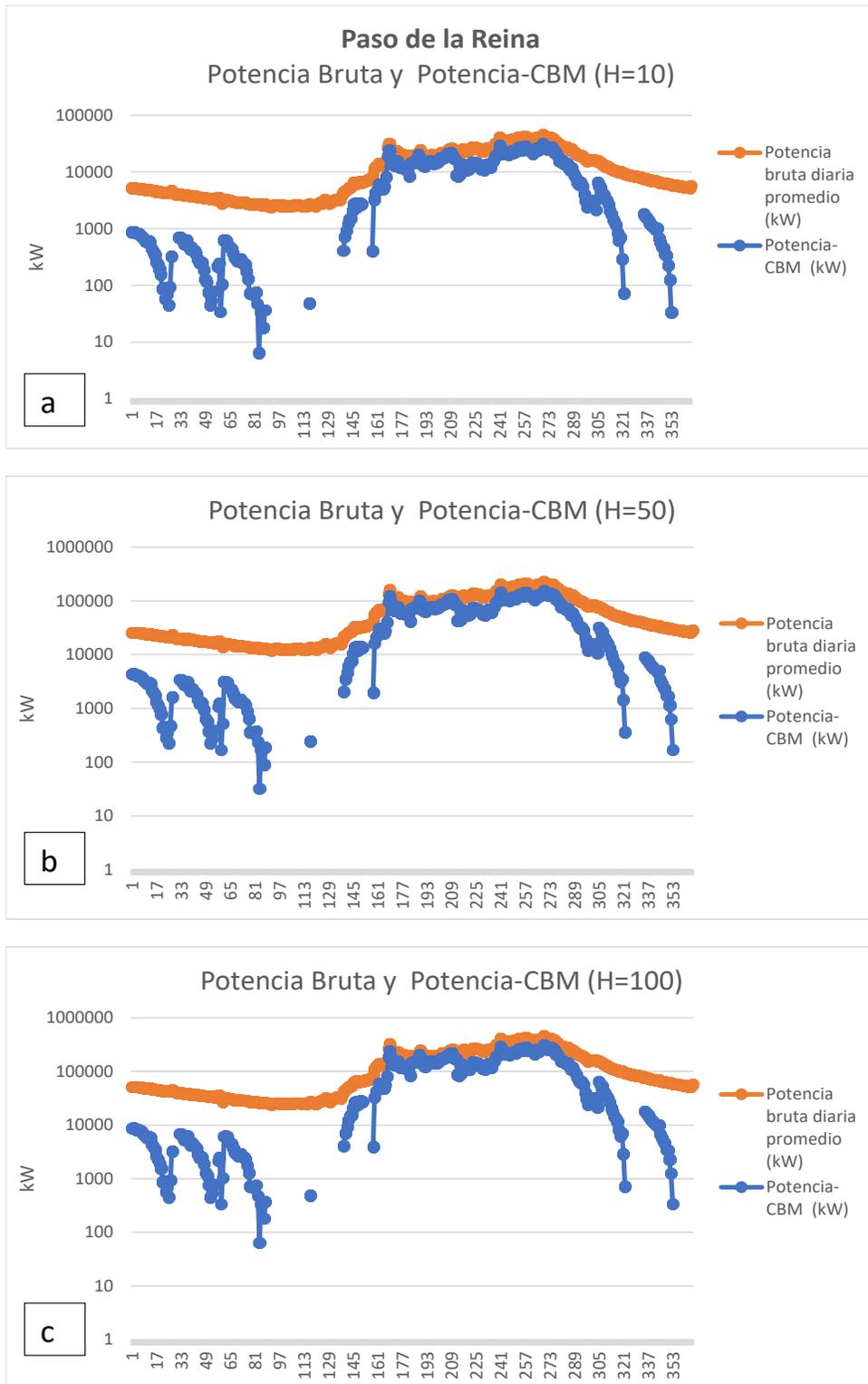


Figura 111. Potencia diaria promedio y potencia menos Caudal Bajo Mensual para cada escenario de carga de la estación Paso de la Reina.

8.4 Determinación de equipos para cada sitio

El último resultado obtenido fue el tipo de turbinas más adecuado para cada sitio obtenido a partir de la figura 9. Una vez determinados los valores de carga y la generación correspondientes, así como los valores de caudal para cada estación; los resultados obtenidos muestran que las estaciones Paso Ancho, con un caudal máximo de 47.8 m³/s (Figura 112, a); Yutacua, con 67 m³/s (Figura 112, b); Nusutia, con 137 m³/s (Figura 112, c); Ixtayutla, con 164 m³/s (Figura 112, d); El Carrizo, con 330 m³/s (Figura 112, e) y Paso de la Reina, con 377 m³/s (Figura 112, f) las turbinas más adecuadas serían las Francis, Kaplan y de Michell Banki.

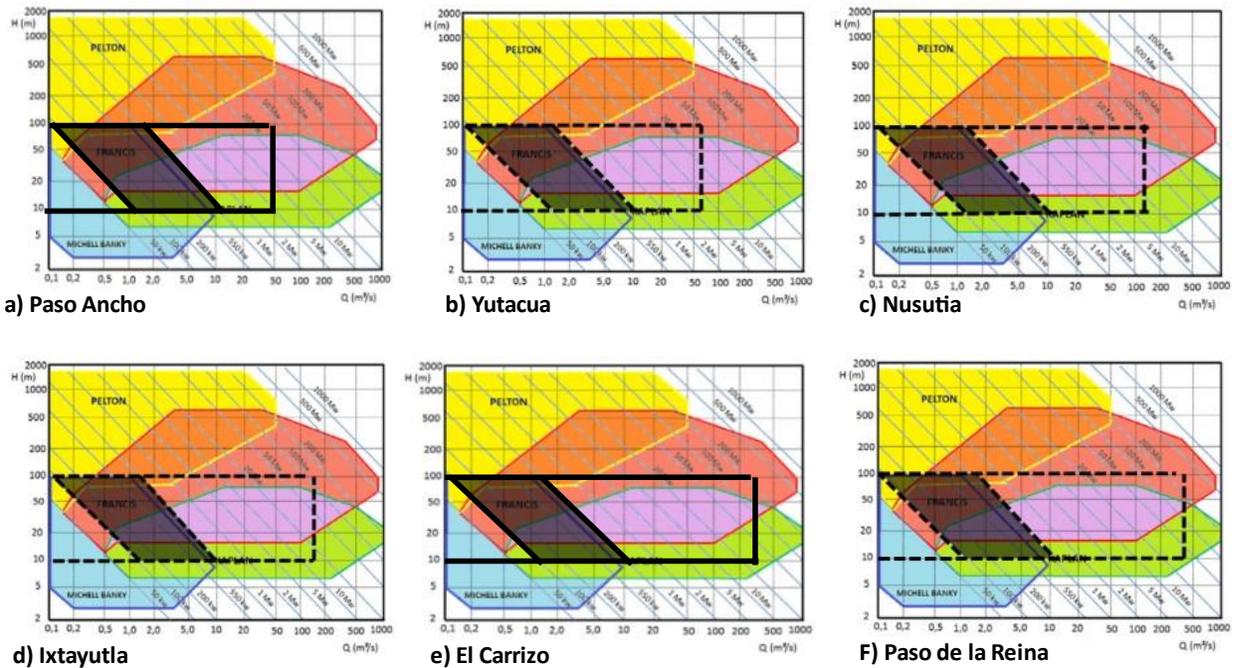


Figura 112. Determinación de equipos para cada estación.

9 Discusión

9.1 Características geográficas e hidrológicas de la cuenca del río Verde.

A partir de los resultados obtenidos sobre el orden del río Verde y la delimitación de las subcuencas se identificó una red hídrica compleja, la cual es consistente con la orografía accidentada de la Sierra Madre del Sur. Esta red hídrica puede separarse en tres secciones, las vertientes este y oeste y una sección final, desde la unión de las dos primeras vertientes hasta la desembocadura en el océano Pacífico.

La vertiente este corresponde al río Atoyac, con un valor de orden siete desde su confluencia con el río Salado, al norte de la subcuenca, hasta la unión con el río Verde 315 km aguas abajo (Mapa 1). Posee cinco tributarios de orden seis y tiene siete subcuencas principales (Mapas 2 y 3). La norma NMX-AA-159-SCFI-2012 divide esta vertiente en dos subcuencas, ambas con objetivo ambiental “B”, con importancia ecológica alta y presión de uso media (Tabla 1). A pesar de ser la vertiente de mayor longitud, las estaciones hidrométricas de la parte alta (Oaxaca Atoyac, Oaxaca Salado, Zimatlán y Tlapacoyan) suelen tener periodos de entre 10 a 130 días con caudal cero al año y los caudales promedio anuales que no superan los 6.5 m³/s (Figuras 38 y 39). Un ejemplo característico de las estaciones en la vertiente norte del río Atoyac es la estación Oaxaca Salado, su perfil altitudinal muestra que para alcanzar una carga de 100 m es necesario remontar 35 km sobre el río (Figura 43), tiene hasta 50 días al año de caudal cero (Figura 44), el caudal anual promedio no alcanza los 2 m³/s (Figura 38), la curva de duración de caudales muestra una probabilidad del 95% para un caudal de 0.05 m³/s y de 15% para 1



m³/s (Figura 45). Por otra parte, las estaciones Oaxaca Atoyac, Zimatlán y Tlapacoyan también se encuentran sobre el río Atoyac, no poseen pendientes tan pronunciadas como el río Salado (Figuras 40, 46, 49) y aunque tienen caudales promedio mayores, la cantidad de días con caudal cero (Figura 39), los valores de sus curvas de duración de caudales con caudales menores a 1m³/s (Figuras 42, 48 y 51) y los valores de caudal anual promedio, las hacen poco atractivas para el desarrollo minihidroeléctrico. Debido a esta serie de características las estaciones Oaxaca Atoyac, Oaxaca Salado, Zimatlán y Tlapacoyan fueron descartadas de los análisis sobre caudales extremadamente bajos, caudales diarios promedio, caudales bajos mensuales, curva de duración de caudales restando los caudales bajos mensuales y potencia. La única estación de la vertiente este que no fue descartada bajo los criterios mencionados fue la estación Paso Ancho.

La vertiente oeste de la cuenca del río Verde inicia en la confluencia del río Verde con el río Minas y termina en la confluencia con el río Atoyac, tiene una longitud de 198.4 km (Mapa 1) y es de orden ocho. Posee dos tributarios de orden 7, el río Minas y el río Cuanana, cinco tributarios de orden seis y se divide en cinco subcuencas principales (Mapas 2 y 3). La norma NMX-AA-159-SCFI-2012 le otorga un objetivo ambiental “A”, debido a que se considera una cuenca con una presión de uso baja y una importancia ecológica alta, además de un estado de conservación “Muy Bueno”. En esta vertiente se encuentran cinco estaciones hidrométricas (Yutama, Nduave, Yutacua, Nusutia e Ixtayutla), ninguna presenta días con caudal cero y los caudales promedio anuales van desde los 1.55 hasta los 106.1 m³/s (Figura 38). Las pendientes de los ríos aguas arriba de las estaciones Yutacua e Ixtayutla permiten adquirir cargas de más de 50 m en distancias menores a 10 km. Por otra parte, las curvas de duración de caudales en las



estaciones Yutama y Nduave tienen valores menores de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ para una probabilidad de 95% (Figuras 53 y 59). En la tabla 3 se muestran los resultados de los caudales promedio y los picos altos y bajos obtenidos de los datos históricos, resaltan las diferencias de caudal promedio anual entre las estaciones Yutama con $1.55 \text{ m}^3/\text{s}$ y Nduave con $2.18 \text{ m}^3/\text{s}$, respecto al resto de las estaciones de esta vertiente; Yutacua con $30.85 \text{ m}^3/\text{s}$, Nusutia con $68 \text{ m}^3/\text{s}$ e Ixtayutla con $106 \text{ m}^3/\text{s}$. Estas diferencias también se encuentran al observar los años de registros hidrológicos, con nueve años para Yutama y 13 años para Nduave, mientras que el resto de las estaciones tienen al menos 27 años. Para las estaciones Yutama y Nduave los caudales extremadamente bajos son menores a $0.32 \text{ m}^3/\text{s}$ y $0.28 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivamente, en consecuencia, los caudales disponibles para generación pueden considerarse bajos, especialmente en el periodo de estiaje. Además, al obtener la curva de duración de caudales utilizando la resta de los caudales bajos mensuales a los caudales diarios promedio, la disponibilidad de caudal se reduce aún más. En el caso de la estación Yutama el caudal mínimo disponible es de $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ con una probabilidad del 77%, el 23% restante no se cuenta con caudal disponible ya que es menor al caudal bajo mensual establecido. Por su parte, la estación Nduave no presentó días sin caudal disponible, sin embargo, la probabilidad de ocurrencia de un caudal de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ es menor al 40%, mientras que la probabilidad de alcanzar $3 \text{ m}^3/\text{s}$ se reduce al 6.5% y superar los $5 \text{ m}^3/\text{s}$ es 1%. En consecuencia, las estaciones Yutama y Nduave fueron excluidas de los análisis de potencia y potencia menos caudales bajos mensuales.

En su sección final, después de la confluencia con el río Atoyac, el río conserva el nombre de río Verde hasta su desembocadura en el océano Pacífico, siendo de orden ocho y con una longitud de 104 km (Mapa 1). Este último tramo no posee tributarios de

orden seis o mayor y solo se dividió en dos subcuencas, la del bajo río Verde y la del río Leche (Mapas 2 y 3). La norma NMX-AA-159-SCFI-2012 le otorga un objetivo ambiental “B”, ya que posee una importancia ecológica media y una presión de uso baja. En este tramo se encuentran tres estaciones hidrométricas, El Carrizo, Paso de la Reina y Juquila. La estación Juquila fue la primera descartada de los análisis, ya que solo posee dos años de datos hidrométricos (Tablas 2 y 3). Las dos estaciones restantes no poseen días con caudales cero, sus caudales promedio anuales superan los 150 m³/s, las pendientes analizadas muestran que se pueden adquirir cargas de más de 100 m remontando distancias menores a 20 km (Figuras 96 y 104) y sus curvas de duración de caudales superan los 10 m³/s con una probabilidad de ocurrencia del 95% (Figuras 97 y 105). Esto permitió incluir a las estaciones El Carrizo y Paso de la Reina en los análisis de caudales extremadamente bajos, caudales diarios promedio, caudales bajos mensuales, curva de duración de caudales restando los caudales bajos mensuales, potencia y potencia restando los caudales bajos mensuales.

9.2 Potencial minihidroeléctrico y caudales ambientales en las estaciones hidrométricas seleccionadas

Una vez determinadas las características generales para establecer una central minihidroeléctrica, solo seis de las 13 estaciones de la cuenca cumplieron los requerimientos mínimos. Las estaciones Paso Ancho, Yutacua, Nusutia, Ixtayutla, El Carrizo y Paso de la Reina tienen las características mínimas para la instalación de proyectos minihidroeléctricos (Mapa 2), por lo que se procedió a calcular el potencial



hidroeléctrico para cada una, así como las diferencias entre el potencial con todo el caudal disponible y el potencial restando los valores de caudales bajos mensuales. Para los fines de este trabajo, los caudales bajos mensuales (CBM) son considerados el componente más importante del caudal ambiental, ya que logran preservar las condiciones ecológicas de los ríos durante el periodo de estiaje. Posteriormente, se estableció qué tipo de obra se adapta mejor a las condiciones del sitio estudiado. Finalmente, a partir del potencial, la carga y el caudal disponible se estableció de manera general cuales son los equipos más adecuados para las condiciones encontradas (Avelino Pérez, 2016; Ball et al., 2020; Sandoval Erazo, 2018).

Los tres diferentes escenarios de carga hidráulica estudiados fueron 10, 50 y 100 m, sí bien es deseable el aumento de la carga para aumentar la potencia, la construcción de una cortina de 100 m en las estaciones Yutacua, Nusutia, Ixtayutla y El Carrizo podría resultar técnicamente complicado y costoso (Figuras 66, 73, 80 y 87), debido a su lejanía y aislamiento geográfico (Mapa 2), mientras que una derivación para esta misma carga, en el caso de Paso Ancho y Nusutia, implicaría un canal de más de 50 km de longitud (Figuras 59 y 73), en comparación con Yutacua, Ixtayutla, El Carrizo o Paso de la Reina donde este canal implicaría menos de 10 km (Figuras 66, 80, 87 y 94; Mapa 2).

La estación Paso Ancho presenta para los meses de noviembre a abril, caudales bajos mensuales que se encuentran por debajo de los caudales promedio diarios durante 41 días (11.3% del año), este comportamiento se puede confirmar al observar la curva de duración de caudales obtenida de la resta de los caudales bajos mensuales (Figura 69) y en cálculo de la potencia conservando los caudales ambientales (Figura 71). Este comportamiento indica que los caudales ecológicos se encuentran por debajo de las

condiciones mínimas, lo que a su vez repercute en que no exista agua disponible para generación hidroeléctrica. Por otra parte, la estación presenta una potencia 100 veces menor durante el estiaje que en los meses de lluvia, con oscilaciones muy pronunciadas durante los periodos en los que sí existe disponibilidad de caudal. La potencia para los meses de lluvia (mediados de mayo a principios de noviembre) estaría muy cercana a los valores de potencia sin restar los caudales bajos mensuales, esto significa que durante el periodo de lluvias mantener los caudales bajos mensuales no representa un impacto en la potencia calculada, debido a que el caudal sobrepasa fácilmente las necesidades ecológicas (Figura 68). De esta manera, al tener en cuenta las características de pendiente y potencial, los esquemas de obra más apropiados serían con embalse o con derivación, capaces de generar carga de 10 a 50 m. Estos valores se adaptan a los sugeridos para las turbinas Michell Banki las cuales se ajustan a la generación entre los 100 kW y 1,000 kW, correspondientes a minihidroeléctricas, ya que poseen un buen rendimiento para caudales menores al nominal y pueden utilizarse con derivaciones que generen cargas altas (Ball et al., 2020). Por otra parte, las turbinas de tipo Francis o Kaplan también pueden ser utilizadas para una central minihidroeléctrica y aunque suelen utilizarse para proyectos con generación mayor a 1,000 kW, son funcionales desde 50 kW con cargas de más de 7 m y caudales mayores a 1 m³/s (Figura 112; a) (Avelino Pérez, 2016; Sandoval Erazo, 2018; Zegarra Macedo, 2020).

La estación Yutacua presenta 89 días (24.3% del año) con caudales promedio diarios menores a los caudales bajos mensuales, lo cual también puede observarse en la curva de duración de caudales cuando se restan los caudales bajos mensuales (Figura 77), estos días con potencia cero se presentan en el periodo de octubre a mayo; en este

mismo periodo la potencia es muy baja e inestable, teniendo pequeños picos y cayendo hasta llegar a cero, donde se mantiene por varias decenas de días (Figura 79). Por otra parte, entre los meses de junio a octubre, la potencia es muy alta y no presenta grandes diferencias respecto al escenario de la potencia bruta, los cuales se encuentran alrededor de los 10,000 kW con carga de 10 m (Figura 78 y 79). Debido a la lejanía de esta estación, lo aislado del terreno y la pendiente que el río presenta en este tramo, un esquema de derivación que genere una carga de 100 m sería conveniente, al requerir menos de 10 km de canal (Mapa 2; Figuras 72). Esta carga alta, requeriría una turbina Francis o bien Michell Banki (Figura 112; b) (Ball et al., 2020; Sandoval Erazo, 2018).

La estación Nusutia tiene 121 días (33.1% del año) con potencia cero, lo que implica que un tercio del año no hay suficiente caudal para cumplir con el caudal bajo mensual y reservar una parte para la generación, en la curva de duración de caudales obtenida restando los caudales bajos mensuales se puede observar claramente que solo hay caudal disponible hasta el 66% de probabilidad con un valor de 0.6 m³/s (Figura 85). Esto repercute en que los meses entre noviembre y junio la potencia sea inestable, mientras que entre marzo y mayo no existiría caudal disponible para generación eléctrica, ya que todo se utilizaría para alcanzar los caudales bajos mensuales. De esta manera, la potencia estaría disponible entre mediados de junio y mediados de noviembre alcanzando valores que superan los 10,000 kW, aunque con una caída importante desde inicios de octubre (Figura 87). Debido a las características del río Putla, la estación Nusutia necesitará un canal de derivación de más de 25 km para alcanzar 100 m de carga, mientras que un canal de menos de 10 km generaría 50 m de carga (Figura 80). Además, la construcción de una cortina estaría sujeta a las complicaciones propias del aislamiento del sitio (Mapa

2). En este sentido, el esquema más apropiado es el de derivación con una turbina capaz de funcionar con una carga de 50 m y menores a $10 \text{ m}^3/\text{s}$, lo cual corresponde a las turbinas Francis o Michell Banki (Figura 112; c) (Ball et al., 2020; Sandoval Erazo, 2018).

La estación Ixtayutla contabilizó 32 días (8.8% del año) con potencia cero, lo cual la hace la estación con menor cantidad de días sin potencia para generar de toda la cuenca, además de que la probabilidad de alcanzar o exceder $1 \text{ m}^3/\text{s}$ es de 89.5% una vez restados los caudales bajos mensuales (Figura 93). Las potencias más bajas en el escenario de carga de 100 m superan los 10,000 kW, mientras que las más altas superan los 100,000 kW durante la temporada de lluvia; esta condición de 100 m de carga es plausible debido a que la topografía del río Verde permite adquirir esta carga con un canal de alrededor de 13 km. Los valores menores a 10,000 kW solo se presentan en los meses de noviembre a mayo, siendo entre abril y mayo el periodo en el que la potencia cae por debajo de los 1,000 kW (Figura 95). Para esta central el esquema sugerido es el de derivación, ya que permite ganar carga en una distancia relativamente corta, alrededor de 15 km (Figura 88), mientras que el tipo de turbina correspondería al tipo Francis o Pelton, debido a que los caudales en este tramo del río Verde son mayores que en los ríos discutidos anteriormente (Figura 112; d) (Avelino Pérez, 2016; Ball et al., 2020; Zegarra Macedo, 2020).

La estación El Carrizo presenta 79 días (21.6% del año) con potencia cero, es decir con caudales diarios menores a los caudales bajos mensuales, lo cual puede observarse en la curva de duración de caudales generada restando los caudales bajos mensuales a los caudales diarios promedio (Figura 101), siendo las potencias más inestables de todas las estaciones hidrométricas analizadas. Entre enero a marzo, la potencia se encuentra

por debajo de los 10,000 kW y para los meses de abril a mayo se encuentra el periodo con mayor cantidad de días con potencia cero. Por otra parte, desde finales de octubre hasta enero la potencia tiene pequeñas subidas, seguidas por rápidas caídas y pocos días con potencia cero. Para la temporada de lluvias, entre junio y octubre las potencias superan los 10,000 kW, incluso cuando se calculan utilizando una carga de 10 m y llegan a más de 600,000 kW en el punto más alto del escenario con carga de 100 m (Figura 103). Esta carga de 100 m es posible debido a que la topografía de río Verde permite adquirirla con una distancia de alrededor de 10 km aguas arriba del sitio (Figura 96). Esto hace que el mejor esquema para esta estación sea el de derivación, mientras que las turbinas más eficientes en estas condiciones de caudal, carga y potencia son las Francis, ya que son capaces de generar hasta con un 40% del caudal nominal (Avelino Pérez, 2016; Ball et al., 2020; Sandoval Erazo, 2018; Zegarra Macedo, 2020), lo que podría aminorar el efecto que produce la inestabilidad del caudal disponible (Figuras 112; e).

La estación Paso de Reina contabilizó 87 días (23.8% del año) con caudales promedio menores a los caudales bajos mensuales, lo que provocó que el cálculo de la potencia para esos días sea cero, lo cual puede confirmarse en la curva de duración de caudales generada de la resta de los caudales bajos mensuales a los caudales diarios promedio (Figura 109). Las potencias obtenidas en el periodo de estiaje, de noviembre a mayo, presentaron potencias muy inestables y con excepción de finales de octubre las potencias se encuentran por debajo de 1,000 kW para una carga de 10 m y por abajo de 10,000 kW para las cargas de 50 y 100 m. Por otra parte, entre junio y octubre supera los 100,000 kW cuando la carga de es 100 m (Figura 111). La sección aguas arriba del sitio Paso de la Reina requiere de alrededor de 20 km para adquirir una carga de 100 m, lo



cual podría elevar la complejidad y los costos (Figura 104). En consecuencia, el esquema de obras que mejor se adapta es el de derivación. Sin embargo, la gran cantidad de días con potencia cero, podría ser un factor que favorezca un esquema con embalse, como el diseñado para el proyecto “Aprovechamiento Hidráulico de Usos Múltiples Paso de la Reina”, promovido en este sitio por la CFE. Por otra parte, suponiendo una carga de 100 o 50 m y caudales menores a 377 m³/s en la temporada de lluvias, las turbinas más adecuadas serían de tipo Francis o Pelton, dado que el caudal en esta última estación hidrométrica no es un factor limitante durante la temporada de lluvia (Figuras 112; f) (Avelino Pérez, 2016; Ball et al., 2020; Zegarra Macedo, 2020).

Los resultados obtenidos en las estaciones hidrométricas analizadas muestran una reducción en la potencia calculada una vez que se resta los caudales ambientales en forma de caudales bajos mensuales, este efecto resulta muy evidente durante el periodo de estiaje debido a que los valores de caudal ambiental, en forma de caudales bajos mensuales, se encuentra muy cercanos al caudal total presente y en muchas ocasiones se encuentran por debajo del mismo. Esto indica, desde el punto de vista ecológico que los ríos se encuentran bajo estrés hídrico, comprometiendo la preservación de los hábitats y sus características mínimas. Aunque este efecto ocurre en los ríos sin alteraciones al régimen natural, al ocurrir una alteración a través de la construcción de una central minihidroeléctrica este efecto se potencia, generando un impacto mayor sobre los componentes ecológicos más sensibles y provocando en consecuencia un desequilibrio ecológico en los ríos y sus sistemas asociados.

Al analizar de manera más detallada las características de altura y caudal para cada sitio, fue posible refinar la selección de los equipamientos más adecuados. De esta



manera, las turbinas más adecuadas para los sitios estudiados son los modelos Francis para todas las estaciones; Michel Banky para Paso Ancho, Yutacua y Nusutia; Pelton para Ixtayutla, el Carrizo y Paso de la Reina; y Kaplan para Paso Ancho. En algunos casos, los sitios pueden tener hasta tres diferentes tipos de turbina, esto se debe a que los análisis se realizaron utilizando alturas entre 10 y 100 m, la generación se acotó entre 100 y 1,000 kW y existe una amplia versatilidad en los diferentes modelos. Sin embargo, predominan las turbinas Francis para todas las estaciones, las Michel Banki para las estaciones con menores caudales y las Pelton cuando existe caudales mayores que podrían ser utilizados en pequeñas centrales en lugar de minihidroeléctricas (Figura 112; a,b,c,d,e,f).

10 Conclusiones

Para determinar la capacidad de cada estación hidrométrica para desarrollar una central minihidroeléctrica se utilizaron los días con caudal cero, los caudales promedio anuales, los caudales pico y el perfil altitudinal del río como primer filtro, además la cuenca del río Verde se dividió en vertiente este, oeste y final, cada uno con sus respectivas subcuencas y el orden de los ríos. En la vertiente este se descartaron cuatro estaciones hidrométricas, siendo la estación Paso Ancho la única considerada apta. Por su parte, la vertiente oeste posee características hidrológicas y orográficas más estables, por lo que en un principio no se descartó ninguna estación. En la vertiente final solo fue descartada la estación Juquila, debido a que no existen suficientes años de análisis hidrométricos. De esta manera se puede concluir que la vertiente este de la cuenca del río Verde es menos apta para el desarrollo de centrales minihidroeléctricas, aunque sea la de mayor área de captación, mientras que las vertientes oeste y final poseen mejores características hidrológicas y orográficas generales para el desarrollo de centrales minihidroeléctricas.

Una vez establecidas las estaciones con características mínimas para mantener una central minihidroeléctrica, se determinó el comportamiento del régimen natural de para cada estación. Los resultados obtenidos mostraron que las estaciones Yutama y Nduave de la vertiente oeste poseen caudales bajos la mayor parte del año y los caudales extremadamente bajos indican un alto estrés hídrico. De esta manera se concluye que el régimen natural de las estaciones Yutama y Nduave limita la cantidad de agua disponible para el desarrollo de centrales minihidroeléctricas, por lo que también fueron descartadas.



Para las estaciones Paso Ancho, Yutacua, Nusutia, Ixtayutla, El Carrizo y Paso de Reina se calculó el potencial hidroeléctrico diario o potencia bruta, posteriormente se recalcularon las potencias diarias promedio restando los caudales bajos mensuales (CBM) a los caudales diarios promedio. Los resultados de algunas estaciones mostraron la ausencia de caudal disponible para generación al realizar dicha resta, el resultado de este comportamiento se expresó como días con potencia cero, es decir sin capacidad para generación. Es así como se puede concluir que la resta del caudal bajo mensual, como componente mínimo del caudal ambiental, limitó la potencia calculada durante los meses con caudales más bajos. Estos resultados también indican que contar con caudales mayores no es garantía para obtener potencias durante el periodo de estiaje. Siendo las estaciones Paso Ancho, Ixtayutla y El Carrizo las que tiene mejores condiciones de generación una vez recalculada la potencia.

En cuanto a los esquemas de obras y equipos más adecuados para cada estación, el esquema más frecuente es por derivación, siendo los más compatibles con la orografía de la cuenca, la cual presenta pendientes importantes en distancias cortas, maximizando la generación. Por su parte, los tipos de turbina que más se adecuaron a los sitios fueron las Francis, debido a una gran plasticidad en cuanto a los caudales y la carga utilizables, también las turbinas Michell- Banki presentan un rendimiento casi constante con caudales mucho menores al nominal. Finalmente, cuando los caudales son mucho mayores, como en el caso de las estaciones El Carrizo y Paso de la Reina ubicadas en la vertiente final de la cuenca, un diseño de minihidroeléctrica no sea el más adecuado, dado que los caudales mayores suelen asociarse a generaciones mucho más altas, correspondientes a grandes centrales.

Es posible afirmar que la resta del caudal bajo mensual al caudal diario promedio ayudó a evaluar los sitios y a clasificarlos según su potencial minihidroeléctrico. Además, se encontró una clara disyuntiva entre la conservación de los caudales ambientales y la obtención de potencia durante el periodo de estiaje. Esta disyuntiva puede ser solventada favoreciendo diseños que generen solo durante el periodo de lluvias, permitiendo a los ríos conservar su régimen natural durante el estiaje y solo generando cuando el caudal no es un recurso limitante en el ecosistema, lo que permitiría centrales de mayor tamaño, aunque con generación limitada temporalmente.

Determinaciones del caudal ambiental a través de métodos hidrobiológicos u holísticos permitiría una comprensión más detallada de los caudales, estableciendo diseños más adecuados para cada sitio con capacidad minihidroeléctrica. El establecimiento de las características de los caudales ambientales, durante etapas tempranas de la planeación de las centrales minihidroeléctricas es una estrategia que puede ayudar a la conservación de los ecosistemas pluviales, permitiendo realizar diseños de minicentrales más adecuados a las condiciones ecológicas de los ríos, maximizando la generación y conservando los ecosistemas asociados a los ríos.

11 Referencias

- Adhikary, P., & Kundu, S. (2014). Small Hydropower Project: Standard Practices. *International Journal of Engineering Science & Advanced Technology*, 4(2), 241–247. http://ijesat.org/Volumes/2014_Vol_04_Iss_02/IJESAT_2014_04_02_20.pdf
- Al Khudhiri, N., Dol, S. S., & Khan, M. S. (2018). Design of hydro-power plant for energy generation for a mid-size farm with insufficient water distribution networks. *2018 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences, ASET 2018, December*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICASET.2018.8376799>
- Aparicio, F. J. (1992). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. Limusa.
- Arévalo-Mejía, R., Leblais, E., Salinas-Tapia, H., Mastachi-Loza, C. A., Bâ, K. M., & Díaz-Delgado, C. (2020). A baseline assessment of hydrologic alteration degree for the Mexican catchments at gauged rivers (2016). *Science of the Total Environment*, 729. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139041>
- Arias, V., & Terneus, E. (2012). Análisis del marco legal e institucional para caudales ecológicos en el Ecuador. *Documento Centro Ecuatoriano de Derecho Ambiental*, 75.
- Arthington, A. H., Bhaduri, A., Bunn, S. E., Jackson, S. E., Tharme, R. E., Tickner, D., Young, B., Acreman, M., Baker, N., Capon, S., Horne, A. C., Kendy, E., McClain, M. E., Poff, N. L. R., Richter, B. D., & Ward, S. (2018). The Brisbane Declaration and Global Action Agenda on Environmental Flows (2018). *Frontiers in Environmental Science*, 6(JUL), 1–15. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00045>
- Arthington, A. H., Tharme, R. E., Brizga, S. O., Pusey, B. J., & Kennard, M. J. (2004a). Environmental flow assessment with emphasis on holistic methodologies. *Proceedings of the Second International Symposium on the Management of Large Rivers for Fisheries Volume II*, II(February 2016), 37–65. <http://www.fao.org/docrep/007/ad526e/ad526e07.htm#bm07>
- Arthington, A. H., Tharme, R. E., Brizga, S. O., Pusey, B. J., & Kennard, M. J. (2004b). Environmental flow assessment with emphasis on holistic methodologies. *Proceedings of the Second International Symposium on the Management of Large Rivers for Fisheries Volume II*, II(February 2016), 37–65. <https://doi.org/10.1002/rra.728>
- Avelino Pérez, C. M. (2016). *Análisis del potencial hidroeléctrico en cuencas aforadas de la costa del estado de Guerrero.pdf* [Tesis]. UNAM.
- Ball, I., Berg, L., Buiting, M., Courret, D., Laurent, D., Dewitte, M., Henke, A., Janicki, W., Munch-Alligne, C., Lorezno Papetti, L., Pelikan, B., Richard, S., Rutschmann, P., Sagnes, P., & Steller, J. (2020). *Tecnologías de pequeña energía hidroeléctrica - Innovaciones europeas de vanguardia*. https://www.hyposo.eu/HYPOSO_Publications/HYPOSO_Handbook_Spanish_final.pdf

- Belmonte, S., Viramonte, J., Núñez, V., & Franco, J. (2008). Estimación Del Potencial Hidráulico Para Generación De Energía Eléctrica Por Microturbinas Mediante Herramientas Sig-Valle De Lerma (Salta). *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 12, 06–73. <http://asades.org.ar/modulos/averma/trabajos/2008/2008-t006-a011.pdf>
- BHA. (2005). A Guide To Uk Mini-Hydro Development. *The British Hydropower Association*, Version 1.(January), 1–37. https://cms.esi.info/Media/documents/54053_1316613360799.pdf
- Bunn, S. E., & Arthington, A. H. (2002). Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity. *Environmental Management*, 30(4), 492–507. <https://doi.org/10.1007/s00267-002-2737-0>
- Chen, A., Wu, M., & McClain, M. E. (2020). Classifying dams for environmental flow implementation in China. *Sustainability (Switzerland)*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/SU12010107>
- CONAGUA. (2022). *Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS)*. Catálogo de Estaciones Hidrométricas. <https://app.conagua.gob.mx/bandas/>
- Couto, T. B. A., & Olden, J. D. (2018). Global proliferation of small hydropower plants – science and policy. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 16(2), 91–100. <https://doi.org/10.1002/fee.1746>
- Dametew, W. A. (2016). Design and Analysis of Small Hydro Power for Rural Electrification. *Global Journal of Researches in Engineering*, 16(6), 25–45.
- Diario Oficial de la Federación México. (2012). Norma Mexicana Nmx-Aa-159-Scfi-2012 Que Establece El Procedimiento Para La Determinación Del Caudal Ecológico. *Diario Oficial de la Federación México*, 123. [https://doi.org/DOF 20/09/2012](https://doi.org/DOF%2009/2012)
- Dyson, M., Bergkamp, G., & Scanlon, J. (2003). *Flow – The essentials of environmental flows* (2nd Editio). IUCN, Gland, Switzerland.
- Egré, D., & Milewski, J. C. (2002a). The diversity of hydropower projects. *Energy Policy*, 30(14), 1225–1230. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(02\)00083-6](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(02)00083-6)
- Egré, D., & Milewski, J. C. (2002b). The diversity of hydropower projects. *Energy Policy*, 30(14), 1225–1230. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(02\)00083-6](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(02)00083-6)
- ELOHA. (2010). Límites Ecológicos de las Alteraciones Hidrológicas. *Ecological Applications*, 1–4.
- Espinoza-Ayala, J., González, J. A., Rocchiccoli, H., Li, X., Mejía, M. Á., & González-Hita, L. (2011). El río verde, oaxaca estudio de sus cambios de morfología. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 2(4), 131–147.
- European Small Hydropower Association - ESHA. (2004). Guide on How to Develop a Small Hydropower Plant. En *European Small Hydropower Association* (p. 296).
- Galarza Hidalgo, J. L. (2015). Metodología Para El Diseño De Turbinas En Pequeñas Centrales Hidroeléctricas Con Capacidad Menor a 10 Mw- Con Ejemplo De Aplicación Proyecto. En *Escuela Politécnica Nacional*.
- Gobierno del Estado de Oaxaca. (2015). *Manifestación de Impacto Ambiental, Modalidad Regional “Presa Bicentenario de la Independencia (Paso Ancho)”*.

- Gómez-Balandra, M. A., Saldaña-Fabela, M. del P., & Martínez-Jiménez, M. (2014). The Mexican Environmental Flow Standard: Scope, Application and Implementation. *Journal of Environmental Protection*, 05(01), 71–79. <https://doi.org/10.4236/jep.2014.51010>
- Gordon, N. D., McMahon, T. A., Finlayson, B. L., Gippel, C. J., & Nathan, R. J. (2004). Stream hydrology: an introduction for ecologists. En *Stream hydrology: an introduction for ecologists* (second Edi). John Wiley & Sons, Ltd. [https://doi.org/10.1016/0925-8574\(93\)90041-d](https://doi.org/10.1016/0925-8574(93)90041-d)
- INEGI. (2021). *Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM)*. <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>
- INEGI. (2022). *Biblioteca Digital de Mapas*. Mapas. <https://www.inegi.org.mx/app/mapas/>
- International Energy Agency. (2020). *www.iea.org*. Electricity Information: Overview. <https://www.iea.org/reports/electricity-information-overview>
- Kaunda, C. S., Kimambo, C. Z., & Nielsen, T. K. (2012). Potential of Small-Scale Hydropower for Electricity Generation in Sub-Saharan Africa. *ISRN Renewable Energy*, 2012, 1–15. <https://doi.org/10.5402/2012/132606>
- Kumar, P. (2007). *Developing Small and Mini Hydro as a Tool for Sustainable Development*. October, 22–24.
- Mejía-González, M. Á., González-Hita, L., Espinoza-Ayala, J., & González-Verdugo, J. A. (2012). Determinación de las aportaciones de agua dulce a las lagunas costeras Chacahua y Salina Grande, Oaxaca, México, por medio de isótopos ambientales. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 3(3), 53–64.
- Mendoza, E., Silva, R., & Sánchez Linares, C. (2015). *El nuevo manual de diseño de obras civiles de la Comisión Federal de Electricidad*. <http://www.amip.org.mx>
- Meza-Prieto, B., & Aparicio, J. (2018). Evaluación del potencial hidroenergético a pequeña escala en cuencas hidrológicas con un modelo lluvia-escurrencimiento. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 9(1), 69–87. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-01-05>
- Organización de las Naciones Unidas. (2015). Acuerdo de París. *Cop21*, 18.
- Palacios-Fonseca, A. A., (ed.), Peña García, N., Cervantes Carretero, A. A., Güitrón de los Reyes, A., & López Pérez, M. (2017). *Infraestructura Hidroeléctrica Actual de México* (Primera Ed). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, IMTA.
- Papadaki, C., Soulis, K., Ntoanidis, L., Zogaris, S., Dercas, N., & Dimitriou, E. (2017). Comparative Assessment of Environmental Flow Estimation Methods in a Mediterranean Mountain River. *Environmental Management*, 60(2), 280–292. <https://doi.org/10.1007/s00267-017-0878-4>
- Poff, N. L. R. (2018). Beyond the natural flow regime? Broadening the hydro-ecological foundation to meet environmental flows challenges in a non-stationary world. *Freshwater Biology*, 63(8), 1011–1021. <https://doi.org/10.1111/fwb.13038>
- Poff, N. L. R., Allan, J. D., Bain, M. B., Karr, J. R., Prestegard, K. L., Richter, B. D., Sparks, R. E., & Stromberg, J. C. (1997). The natural flow regime: A paradigm for river conservation and restoration. *BioScience*, 47(11), 769–784. <https://doi.org/10.2307/1313099>

- Poff, N. L., & Zimmerman, J. K. H. (2010). Ecological responses to altered flow regimes: A literature review to inform the science and management of environmental flows. *Freshwater Biology*, 55(1), 194–205. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02272.x>
- Pringle, C. (2003). What is hydrologic connectivity and why is it ecologically important? *Hydrological Processes*, 17(13), 2685–2689. <https://doi.org/10.1002/hyp.5145>
- Puig, A., Salinas, H. O., & Castro, A. (2016). Alteraciones del régimen hidrológico fluvial y consideraciones sobre caudales ambientales. *Revista Jurídica de Buenos Aires.*, 9(September), 91–123.
- Punys, P., Dumbrasukas, A., Kvaraciejus, A., & Vyciene, G. (2011). Tools for small hydropower plant resource planning and development: A review of technology and applications. *Energies*, 4(9), 1258–1277. <https://doi.org/10.3390/en4091258>
- Rivas Carpio, J. de J. (2013). *Estudios Básicos para Determinar la Prefactibilidad de un Equipamiento Hidroeléctrico, en Presas Cuyo Propósito es Distinto al de Generación Eléctrica* [Universidad Nacional Autónoma de México]. <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/4142/1/Tesis.pdf>
- Rodríguez, S., & Gomez-Balandra, M. A. (2013). Caracterización del Régimen de Caudal Natural para la asignación del Agua en la cuenca del Río Verde, Oaxaca México. *Aqua-LAC: revista del Programa Hidrológico Internacional para América Latina y el Caribe*, 5(777), 74–87.
- Rodríguez-Torres, S. (2012). *Tesis. Caracterización Ambiental y Determinación de Caudal Ecológico en la Cuenca del Río Verde, Oaxaca.*
- Rodríguez-Torres, S., & Gomez-Balandra, M. A. (2013). *Caracterización del Régimen de Caudal Natural para la Asignación del Agua en la Cuenca del Río Verde, Oaxaca, México.* 5(777), 74–87.
- Rojanamon, P., Chaisomphob, T., & Bureekul, T. (2009). Application of geographical information system to site selection of small run-of-river hydropower project by considering engineering/economic/environmental criteria and social impact. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2336–2348. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.003>
- Rudra, K. (2018). *The Concept of Ecological Flow.* 173–185. https://doi.org/10.1007/978-3-319-76544-0_12
- Sandoval Erazo, W. R. (2018). Conceptos Básicos de Centrales Hidroeléctricas. En *Diseño de obras Hidrotécnicas* (Número July).
- Schenzer, D., Rovira, L., & Pienika, R. (2014). *Potencial hidroeléctrico en pequeña escala de Uruguay.*
- Searcy, J. K. (1959). Flow-duration curves. En *Manual of Hydrology: Part 2. Low-Flow Techniques.* <https://doi.org/10.3133/wsp1542A>
- SEMARNAT. (2019). Listado de Ingresos de Proyectos y Emisión de Resolutivos Derivados del Procedimiento de Evaluación de Impacto Ambiental. *Gaceta Ecológica*, 32.

- Steinmetz, M., & Sundqvist, N. (2014). Environmental Impacts of Small Hydropower Plants. En *Publications Lib. Chalmers Se*.
- Tennant, D. L. (1976). Instream Flow Regimens for Fish, Wildlife, Recreation and Related Environmental Resources. *Fisheries*, 1(4), 6–10. [https://doi.org/10.1577/1548-8446\(1976\)001<0006:IFRFFW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8446(1976)001<0006:IFRFFW>2.0.CO;2)
- The Nature Conservancy. (2011). *Indicadores de alteración hidrológica*. 89. https://www.conservationgateway.org/Documents/IHAV7-1 manual Spanish_0.pdf
- Tkáč, Š. (2018). Hydro power plants, an overview of the current types and technology. *Selected Scientific Papers - Journal of Civil Engineering*, 13(s1), 115–126. <https://doi.org/10.1515/sspjce-2018-0011>
- Torres, S. R. (2012). *Caracterización Ambiental y Determinación de Caudal Ecológico en la cuenca del Río Verde, Oaxaca*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Trelles Jasso, A., Cervantes Carretero, A., Rocchiccioli, H., Orozco Medina, I., Bravo Jácome, A., Velázquez Álvarez, J., Sanvicente Sánchez, H., Hernández Astudillo, C., Rivera Benites, J., Hernández Astudillo, C., & Ruiz Morelos, B.-H. (2007). *Identificación y evaluación de proyectos minihidroeléctricos en las cuencas de los ríos Nautla y Tecolutla , ubicadas en los estados de Puebla y Veracruz*.
- Vannote, R. L., Minshall, G. W., Cummins, K. W., Sedell, J. R., & Cushing, C. E. (1980). The river continuum concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 37(1), 130–137. <https://doi.org/10.1139/f80-017>
- Vörösmarty, C. J., McIntyre, P. B., Gessner, M. O., Dudgeon, D., Prusevich, A., Green, P., Glidden, S., Bunn, S. E., Sullivan, C. A., Liermann, C. R., & Davies, P. M. (2010). Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature*, 467(7315), 555–561. <https://doi.org/10.1038/nature09440>
- World Commission on Dams, T. (2000). Dams and Development: A new Framework for Decision Making. En *Report* (Número November).
- Zegarra Macedo, A. R. (2020). *Metodología para la Selección del Generador en una Mini Central Hidroeléctrica*. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.