



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**CUANTIFICACIÓN DE LA ALTERACIÓN HIDROLÓGICA Y  
RECOMENDACIÓN DE RÉGIMEN HIDROLÓGICO, PARA  
FAVORECER EL SERVICIO ECOSISTÉMICO DE  
PRODUCCIÓN DE PECES, EN LA PARTE ALTA DEL RÍO  
PARANÁ, BRASIL**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL  
**DANIA BELÉN ARAYA ARAYA**

PROFESOR GUIA  
MARCELO OLIVARES ALVEAL

MIEMBROS DE LA COMISION  
MATÍAS PEREDO PARADA  
GUILHERME FERNANDES MARQUES

SANTIAGO DE CHILE  
2020

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE: INGENIERA CIVIL  
POR: DANIA BELÉN ARAYA ARAYA  
FECHA: MARZO 2020  
PROFESOR GUIA: MARCELO OLIVARES ALVEAL**

**CUANTIFICACIÓN DE LA ALTERACIÓN HIDROLÓGICA Y DISEÑO DE RÉGIMEN  
HIDROLÓGICO, PARA FAVORECER EL SERVICIO ECOSISTÉMICO DE  
PRODUCCIÓN DE PECES, EN LA PARTE ALTA DEL RÍO PARANÁ, BRASIL**

En el río Paraná, que nace en Brasil, se encuentran construidas numerosas centrales hidroeléctricas. En una cuenca hidrológica dominada por la hidroelectricidad, se requiere la reoperación de los embalses ubicados en la zona, con el fin de que estos logren mantener, en algún grado, un régimen de caudales que permita sostener la diversidad del hábitat acuático aguas abajo. Este trabajo tiene como fin favorecer específicamente el servicio ecosistémico de producción de peces, debido a que su pesca es el sustento de las comunidades ribereñas.

Entre los embalses Porto Primavera e Itaipú se encuentra un tramo donde no existen represas y, por lo tanto, reoperando los ubicados justo aguas arriba de esta zona, se puede generar aguas abajo las condiciones necesarias para mejorar la producción de peces. Para lo anterior, se debe cuantificar la alteración hidrológica que han generado los embalses, para luego establecer recomendaciones que permitan favorecer el servicio ecosistémico anteriormente mencionado.

En el presente trabajo de título, para realizar la cuantificación de la alteración hidrológica, se adopta el método hidrológico llamado alteración hidrológica, a través de los índices de alteración hidrológica, IHA, y el método análisis de rango de variabilidad, RVA. También, se recopilan y procesan series de caudales diarios naturalizados y medidos, con el fin de comparar los índices hidrológicos calculados para ambos. Por último, tomando como punto de partida el diagnóstico, se relaciona este con la ecología a través de los componentes del caudal ecológico, EFC. Seleccionando un conjunto de estos, a partir de estudios de biólogos de la zona, se recomienda un régimen hidrológico que logre favorecer el servicio ecosistémico de producción de peces.

Los resultados obtenidos demuestran que la alteración hidrológica producida por la construcción de embalses en la cuenca es, en promedio, para todos los índices hidrológicos del 74%, 76%, y 49% y para los caudales promedio mensuales del 70%, 71% y 45% en Porto Sao José, Porto Primavera, y Rosana, respectivamente. También hace 33 años en Porto Sao José, cuando aún no se construían embalses como Porto Primavera y Rosana, el mismo tipo de alteración es del 29% y 19%, respectivamente. Es decir, en los últimos 33 años la alteración en este lugar ha aumentado más del doble.

Por otro lado, los parámetros hidrológicos que según estudios del lugar más se relacionan con la producción de peces son la duración, comienzo, peak y frecuencia de las inundaciones, se estudia también la mayor duración ininterrumpida de una. Finalmente, se recomienda que estos cinco parámetros se acerquen al valor que tendrían en un régimen natural, debido a que los peces deseables son nativos de la zona y se comprueba que los años en los que más se acercan los valores a este rango, la producción de peces aumenta.

*A la Panke.*

## Agradecimientos

Quisiera agradecerle a:

Mis papas y hermano, por estar desde el día uno apoyándome, cada uno a su manera.

Al nacho, por la paciencia (al fin ya no seré monotemática y dejaré de hablar de esto) la compañía y el amor.

A mi grupo de amigos de cuando era mechona, por esas pedidas de sala para estudiar, aún recuerdo el problema de la hormiga.

A mi grupo de amigos de la u, que conocí hace ya varios años y aún sigue, por todos los almuerzos en el pastito y los carretes de viernes en la facultad, para los que siempre había tiempo y un mini parlante.

A la gente que conocí en hidráulica, en especial a mis amigas, puro woman power, gracias por ser buenas compañeras de infinitos trabajos y oncecitas.

A mi profesor guía y la gente de la comisión, por el apoyo y confianza brindada para lograr realizar este trabajo.

# Tabla de Contenido

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1.    | Introducción.....   | 1  |
| 1.1   | Objetivos .....   | 1  |
| 1.1.1 | Objetivo General.....   | 1  |
| 1.1.2 | Objetivos Específicos .....   | 2  |
| 2.    | Revisión Bibliográfica .....  | 3  |
| 2.1   | Metodologías para la cuantificación del caudal que debe mantenerse en un cauce<br>3 |    |
| 2.2   | Métodos hidrológicos .....  | 4  |
| 2.2.1 | IHA, RVA y EFC .....  | 4  |
| 2.2.2 | Otras metodologías y comparación con IHA .....                                      | 5  |
| 2.2.3 | Reciente aplicación de IHA.....   | 9  |
| 2.3   | Métodos hidrológicos con meta ecológica.....  | 10 |
| 3.    | Antecedentes .....  | 13 |
| 3.1   | Proyecto.....   | 13 |
| 3.2   | Zona de estudio .....   | 13 |
| 3.3   | Información sobre peces .....   | 16 |
| 4.    | Metodología .....   | 18 |
| 4.1   | Estudio de métodos de análisis del régimen hidrológico.....                         | 18 |
| 4.2   | Elección de método de análisis.....   | 18 |
| 4.3   | Recopilación de datos.....  | 21 |
| 4.4   | Diagnóstico con respecto a la alteración hidrológica del río.....                   | 22 |
| 4.5   | Selección de atributos y recomendación del régimen hidrológico.....                 | 23 |
| 5.    | Resultados .....  | 24 |
| 5.1   | Análisis preliminar .....   | 24 |
| 5.1.1 | Series de caudales naturales entregadas por el ONS.....                             | 24 |
| 5.1.2 | Validación Serie natural ONS y Porto Sao José ONS .....                             | 25 |
| 5.1.3 | Series de caudales alterados medidos por estaciones de la ANA.....                  | 27 |
| 5.1.4 | Comparación entre las series naturales ONS con las alteradas medidas por ANA.<br>28 |    |
| 5.2   | Caracterización régimen hidrológico .....   | 30 |
| 5.2.1 | Régimen Natural.....  | 31 |
| 5.2.2 | Régimen Alterado .....  | 34 |
| 5.3   | Alteración hidrológica .....  | 38 |
| 5.3.1 | Porto Sao José .....  | 39 |
| 5.3.2 | Porto Primavera.....  | 46 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 5.3.3 | Rosana .....  | 50 |
| 5.4   | Componentes del caudal ecológico .....                    | 54 |
| 5.4.1 | Calculo EFC Sao José.....                                 | 54 |
| 5.4.2 | Cálculo EFC Sao José con límite Suzuki et al. (2009)..... | 56 |
| 5.5   | Recomendación de régimen hidrológico .....                | 59 |
| 6.    | Análisis de resultados .....                              | 64 |
| 6.1.1 | Alteración hidrológica .....                              | 64 |
| 6.1.2 | Recomendación régimen hidrológico.....                    | 65 |
| 7.    | Conclusiones.....   | 67 |
| 8.    | Bibliografía .....  | 69 |

## Índice de Tablas

|             |  |    |
|-------------|--|----|
| Tabla 4.1.  | Lista de los grupos de índices de alteración hidrológica y los parámetros hidrológicos que los definen. Fuente: The Nature Conservancy (2011)..... | 18 |
| Tabla 4.2.  | Lista de componentes del caudal ecológico, definición y parámetros hidrológicos que los definen. Fuente: Mathews & Richter (2007).....             | 20 |
| Tabla 5.1.  | Tabla resumen con el valor de los índices IHA y límites para generar las tres categorías RVA, en Porto Sao José y para los años 1964-1986.....     | 39 |
| Tabla 5.2.  | Valor de la alteración hidrológica, HA, para cada índice y categoría RVA, en Porto Sao José y para los años 1964-1986.....                         | 40 |
| Tabla 5.3.  | Tabla resumen con el valor de los índices IHA y límites para generar las tres categorías RVA, en Porto Sao José y para los años 1994-2014.....     | 43 |
| Tabla 5.4.  | Valor de la alteración hidrológica, HA, para cada índice y categoría RVA, en Porto Sao José y para los años 1994-2014.....                         | 43 |
| Tabla 5.5.  | Tabla resumen con el valor de los índices IHA y límites para generar las tres categorías RVA, en Porto Primavera y para los años 1998-2018. ....   | 47 |
| Tabla 5.6.  | Valor de la alteración hidrológica, HA, para cada índice y categoría RVA, en Porto Primavera y para los años 1998-2018. ....                       | 47 |
| Tabla 5.7.  | Tabla resumen con el valor de los índices IHA y límites para generar las tres categorías RVA, en Rosana y para los años 1993-2018.....             | 51 |
| Tabla 5.8.  | Valor de la alteración hidrológica, HA, para cada índice y categoría RVA, en Rosana y para los años 1993-2018.....                                 | 51 |
| Tabla 5.9.  | Límites predeterminados por el software para cada componente del caudal ecológico. ....  | 55 |
| Tabla 5.10. | Valor de la mediana y coeficiente de dispersión para cada índice EFC, para el periodo natural y alterado. ....                                     | 55 |
| Tabla 5.11. | Límite del componente del caudal ecológico (inundación), según Santos (2009).....  | 57 |
| Tabla 5.12. | Valor de la mediana y coeficiente de dispersión para cada índice EFC, para el periodo natural y alterado. ....                                     | 57 |
| Tabla 5.13. | Valor de seis índices EFC en la serie de caudales naturales y para años en los que se tiene información de producción de peces. ....               | 57 |

|   |    |
|---|----|
| Tabla 5.14. Valor de tres índices importantes en el desarrollo de peces, en la serie de caudales naturales y para años en los que se tiene información de producción de peces. ....                     | 58 |
| Tabla 5.15. Valor de seis índices EFC en la serie de caudales alterados y para años en los que se tiene información de producción de peces. ....  | 58 |
| Tabla 5.16. Valor de tres índices importantes en el desarrollo de peces, en la serie de caudales alterados y para años en los que se tiene información de producción de peces. ....                     | 58 |
| Tabla 5.17 Duración de cada pulso de inundación y el mayor, para cada año en los que se tiene datos sobre la producción de peces, para la serie de caudales naturales en Porto Sao José 1984-2014. .... | 62 |
| Tabla 5.18 Duración de cada pulso de inundación y el mayor, para cada año en los que se tiene datos sobre la producción de peces, para la serie de caudales alterados en Porto Sao José 1984-2014. .... | 63 |

## Índice de Figuras

|  |    |
|--|----|
| <i>Figura 3.1.</i> Cuenca del rio Paraná alto, embalses mayores y ubicación del área de estudio. Fuente: modificado de Agostinho et al. (2004). ....   | 14 |
| <i>Figura 3.2.</i> Abundancia (captura por unidad de esfuerzo - CPUE) de seis especies de peces migratorios capturados en la llanura aluvial del Alto Paraná en los diferentes años (1987-2007) y subsistemas (Paraná, Baía e Ivinheima). Fuente: Suzuki et al (2009). ... | 17 |
| <i>Figura 5.1.</i> Serie de caudales naturales para Porto Primavera, entre los años 1931-2018. ....  | 24 |
| <i>Figura 5.2.</i> Serie de caudales naturales para Rosana, entre los años 1931-2018. ....   | 25 |
| <i>Figura 5.3.</i> Serie de caudales naturales Porto Sao José, entre los años 1931-2018. ....  | 25 |
| <i>Figura 5.4.</i> Correlación lineal y regresión entre series ONS y series MBG. Para Porto Sao José, Poto Primavera y Rosana, entre los años 1980 y 2010. ....  | 26 |
| <i>Figura 5.5.</i> Correlación lineal y regresión entre la serie Porto Sao José MBG y la suma de las series Porto Primavera MBG y Rosana MBG, entre los años 1980 y 2010. ....   | 27 |
| <i>Figura 5.6.</i> Serie de caudales alterados para Porto Primavera, entre los años 1998-2018. ....  | 27 |
| <i>Figura 5.7.</i> Serie de caudales alterados para Rosana entre los años 1993-2018. ....  | 28 |
| <i>Figura 5.8.</i> Serie de caudales alterados para Porto Sao José entre los años 1964-2014. ....  | 28 |
| <i>Figura 5.9.</i> Serie de caudales alterados y naturales para Porto Primavera entre los años 1998-2018. ....   | 29 |
| <i>Figura 5.10.</i> Serie de caudales alterados y naturales para Rosana entre los años 1993-2018. ....   | 30 |
| <i>Figura 5.11.</i> Serie de caudales alterados y naturales para Porto Sao José entre los años 1964-2014. ....   | 30 |
| <i>Figura 5.12.</i> Curva de variación estacional natural en Porto Primavera entre los años 1931-2018, para las probabilidades de excedencia de un 5%, 20%, 50%, 80% y 95%. ....   | 31 |
| <i>Figura 5.13.</i> Curva de variación estacional natural en Rosana entre los años 1931-2018, para las probabilidades de excedencia de un 5%, 20%, 50%, 80% y 95%. ....  | 32 |
| <i>Figura 5.14.</i> Curva de variación estacional natural en Porto Sao José entre los años 1931-2018, para las probabilidades de excedencia de un 5%, 20%, 50%, 80% y 95%. ....  | 32 |

|  |    |
|--|----|
| <i>Figura 5.15.</i> Curva natural de duración para cada mes y anual, en Porto Primavera y entre los años 1931-2018.....  | 33 |
| <i>Figura 5.16.</i> Curva natural de duración para cada mes y anual, en Rosana y entre los años 1931-2018. ....  | 34 |
| <i>Figura 5.17.</i> Curva natural de duración para cada mes y anual, en Porto Sao José y entre los años 1931-2018.....   | 34 |
| <i>Figura 5.18.</i> Curva de variación estacional alterada en Porto Primavera entre los años 1998-2018, para las probabilidades de excedencia de un 5%, 20%, 50%, 80% y 95%. 35  |    |
| <i>Figura 5.19.</i> Curva de variación estacional alterada en Rosana entre los años 1993-2018, para las probabilidades de excedencia de un 5%, 20%, 50%, 80% y 95%. ....   | 36 |
| <i>Figura 5.20.</i> Curva de variación estacional alterada en Porto Sao José entre los años 1964-2014, para las probabilidades de excedencia de un 5%, 20%, 50%, 80% y 95%. 36   |    |
| <i>Figura 5.21.</i> Curva alterada de duración para cada mes y anual, en Porto Primavera y entre los años 1998-2018.....   | 37 |
| <i>Figura 5.22.</i> Curva alterada de duración para cada mes y anual, en Rosana y entre los años 1993-2018. ....   | 38 |
| <i>Figura 5.23.</i> Curva alterada de duración para cada mes y anual, en Porto Sao José y entre los años 1964-2014.....  | 38 |
| <i>Figura 5.24.</i> Mayor alteración hidrológica entre las tres categorías para cada índice, en Porto Sao José y para los años 1964-1986.....  | 41 |
| <i>Figura 5.25.</i> Valor del índice IHA inversiones, para el periodo natural y alterado, en Porto Sao José y para los años 1964-1986. ....  | 42 |
| <i>Figura 5.26.</i> Valor del índice IHA caudal base, para el periodo natural y alterado, en Porto Sao José y para los años 1964-1986. ....  | 42 |
| <i>Figura 5.27.</i> Mayor alteración hidrológica entre las tres categorías para cada índice, en Porto Sao José y para los años 1994-2014.....  | 45 |
| <i>Figura 5.28.</i> Valor del índice IHA conteo de pulsos bajos, para el periodo natural y alterado, en Porto Sao José y para los años 1994-2014.....  | 46 |
| <i>Figura 5.29.</i> Valor del índice IHA caudal base, para el periodo natural y alterado, en Porto Sao José y para los años 1994-2014. ....  | 46 |
| <i>Figura 5.30.</i> Mayor alteración hidrológica entre las tres categorías, para cada índice, en Porto Primavera y para los años 1998-2018. ....   | 49 |
| <i>Figura 5.31.</i> Valor del índice IHA caudal base, para el periodo natural y alterado, en Porto Primavera y para los años 1998-2018.....  | 50 |
| <i>Figura 5.32.</i> Valor del índice IHA mínimo de 1 día, para el periodo natural y alterado, en Porto Primavera y para los años 1998-2018. ....   | 50 |
| <i>Figura 5.33.</i> Mayor alteración hidrológica entre las tres categorías, para cada índice, en Rosana y para los años 1993-2018.....   | 53 |
| <i>Figura 5.34.</i> Valor del índice IHA conteo del pulso alto, para el periodo natural y alterado, en Rosana y para los años 1993-2018.....   | 53 |
| <i>Figura 5.35.</i> Valor del índice IHA conteo del pulso bajo, para el periodo natural y alterado, en Rosana y para los años 1993-2018.....   | 54 |
| <i>Figura 5.36.</i> Cinco componentes del caudal ecológico, para la serie natural y alterada, en Porto Sao José y entre los años 1986-2014.....  | 55 |
| <i>Figura 5.37.</i> Componente del caudal ecológico (inundación), para la serie natural y alterada, en Porto Sao José y entre los años 1986-2014.....  | 57 |
| <i>Figura 5.38.</i> Valor del índice duración total de la inundación y límites RVA, para el periodo natural y alterado. En Porto Sao José y para los años en donde se tiene información sobre la producción de peces. .... | 60 |

*Figura 5.39.* Valor del índice peak total de la inundación y límites RVA, para el periodo natural y alterado. En Porto Sao José y para los años en donde se tiene información sobre la producción de peces. ....60

*Figura 5.40.* Valor del índice fecha de inicio de las inundaciones y límites RVA, para el periodo natural y alterado. En Porto Sao José y para los años en donde se tiene información sobre la producción de peces. ....61

*Figura 5.41.* Valor del índice frecuencia de pulsos y límites RVA, para el periodo natural y alterado. En Porto Sao José y para los años en donde se tiene información sobre la producción de peces. ....62

*Figura 5.42.* Valor del índice mayor duración ininterrumpida de un pulso y límites RVA, para el periodo natural y alterado. En Porto Sao José y para los años en donde se tiene información sobre la producción de peces. ....63

# 1. Introducción

El río Paraná tiene una extensión de 4.000 km entre Brasil, donde se encuentran sus fuentes, Paraguay y Argentina. Forma parte de la cuenca del Plata, que es la segunda cuenca más extensa de Sudamérica, sólo superada por la del río Amazonas y moviliza un caudal promedio de 16.000 m<sup>3</sup>/s. Lo anterior, es una de las razones por las cuales en esta cuenca se puede encontrar una gran cantidad de instalaciones hidroeléctricas.

El trabajo de título forma parte del proyecto titulado “Improving the governance of the floodplain in over-built river basins” financiado por el Inter-American Institute for Global Change Research. Este proyecto tiene como objetivo general, mejorar la gobernanza de la planicie de inundación en las cuencas de ríos sobre construidos y sobre comprometidos, como la parte alta del río Paraná, ubicada en Brasil. En este lugar, el sustento de las comunidades ribereñas a través de la pesca está en riesgo, debido a la degradación de los ecosistemas, causado por la construcción y operación de embalses utilizados para generación de energía eléctrica.

En una cuenca controlada por la generación de electricidad, el mantenimiento de ecosistemas fluviales saludables requiere la reoperación de los embalses para restaurar, al menos parcialmente, un régimen hidrológico, que es una serie temporal de valores de caudal, y los procesos geomorfológicos asociados que mantienen la diversidad del hábitat acuático aguas abajo.

Para lo anterior, se debe en primera instancia cuantificar la alteración hidrológica que ha generado la construcción y operación de embalses en la zona de interés, para luego generar recomendaciones de régimen hidrológico, que permita favorecer el servicio ecosistémico de producción de peces, aguas abajo de los embalses. Para realizar esto, existen diferentes métodos de análisis, como los presentados en Jowett (1997) y Tharme (2003). Este trabajo de título utiliza un método hidrológico llamado alteración hidrológica, el cual cuantifica la alteración a través de los índices de alteración hidrológica, IHA, por sus siglas en inglés (Ritcher et al. 1996) y los componentes del caudal ecológico, EFC, por sus siglas en inglés (Mathews & Richter, 2007). Por otro lado, se obtiene información sobre peces y su servicio ecosistémico, de estudios realizados por biólogos de la zona, como el de Suzuki et al. (2009) y Agosthino et al (2004), con el fin de relacionar los índices hidrológicos, mencionados anteriormente, con atributos ecológicos de peces nativos.

La motivación de este trabajo de título apunta a generar un régimen hidrológico que permita que embalses con uso de generación eléctrica, puedan existir permitiendo que se mantenga la diversidad del hábitat acuático aguas abajo y que así, se logre mejorar el bienestar de servicios ecosistémicos claves, como la producción de peces.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo General

Cuantificar la alteración hidrológica, generada por embalses utilizados para producción de energía eléctrica, en la parte alta del río Paraná, Brasil, y formular recomendación de

régimen hidrológico que logre favorecer el servicio ecosistémico de producción de peces, aguas abajo de estos embalses.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

1. Realizar diagnóstico con respecto a la alteración hidrológica del río, producida por la construcción y operación de embalses.
2. Identificar y seleccionar atributos que caracterizan el régimen hidrológico y se relacionan con el servicio ecosistémico de producción de peces.
3. Generar recomendación preliminar de régimen hidrológico que favorezca dicho servicio.

## 2. Revisión Bibliográfica

La construcción y operación de obras hidráulicas en los ríos puede alterar sus regímenes hidrológicos naturales, ya sea disminuyendo o aumentando algunos de sus atributos, como caudal mínimo o inundaciones.

El mantener ciertos atributos del régimen hidrológico natural en los ríos permite proporcionar, luego de la intervención antropogénica, un nivel de protección a los ecosistemas fluviales que se desarrollan en este. Para realizar esto, se han utilizado a nivel mundial diferentes enfoques. A continuación, se estudian estos con el fin de entender el que utiliza esta investigación, el hidrológico.

Luego, se estudian las diferentes metodologías que se encuentran dentro del enfoque adoptado, y que permiten diseñar un régimen hidrológico a través de múltiples atributos, incluyendo variabilidad. También, se analizan los alcances de estas metodologías y sus aplicaciones recientes. Por otro lado, se estudian metodologías que incluyen alguna meta ecológica específica, como mejorar la producción de algunas especies de peces.

### 2.1 Metodologías para la cuantificación del caudal que debe mantenerse en un cauce

Para la cuantificación del caudal que debe existir en un cauce existen tres categorías principales: caudal histórico, geometría hidráulica y hábitat. Estas metodologías presentan diferencias conceptuales básicas, los dos primeros están relacionados con el tamaño del río y tienden a retener su carácter, por otro lado, el método de hábitat no hace suposiciones sobre el estado natural del río y, el caudal se basa principalmente, en los requisitos de profundidad y velocidad del agua (Jowett, 1997).

Los métodos de caudal histórico e hidráulico suponen que caudales más bajos que los naturales dañan los ecosistemas fluviales, mientras que los métodos de hábitat aceptan la posibilidad de que algunos aspectos del ecosistema natural pueden mejorarse y generar mayores beneficios. Los métodos de hábitat se centran en las especies objetivo o en los usos específicos de la corriente, y son útiles cuando hay objetivos de manejo claros y una comprensión de los requisitos del ecosistema, por otro lado, los métodos de caudal histórico e hidráulico son útiles en casos donde hay una mala comprensión del ecosistema, o cuando se requiere un alto nivel de protección para uno existente (Jowett, 1997).

A nivel global se pueden encontrar hasta 207 metodologías para la cuantificación del caudal que debe mantenerse en el cauce, registradas para 44 países, dentro de seis regiones del mundo (Tharme, 2003). Entre estas se encuentran metodologías hidrológicas, hidráulicas, de simulación de hábitat y holísticas, con otras dos categorías que representan la combinación de los tipos anteriores y otros enfoques.

Los métodos basados en la hidrología constituyeron la mayor proporción del número total de metodologías registradas, 30%, con un total de 61 índices o técnicas hidrológicas diferentes, seguido de cerca por la simulación de hábitat. En los últimos años las metodologías más sofisticadas basadas en la hidrología, especialmente el método de

rango de variabilidad, RVA, (Richter et al., 1996, 1997), han generado interés fuera de los países en los que se desarrollaron, a través de su mayor énfasis en la variabilidad del caudal y/o la utilización de múltiples índices hidrológicos ecológicamente relevantes en la determinación de caudales ecológicos (Tharme, 2003).

Okawa (2009) estudia la misma zona que en esta investigación, donde introduce un nuevo concepto de caudal ecológico, en el que el caudal mínimo que debe haber en un río se sustituye por una serie temporal de valores de caudal, denominada "Hidrograma ecológico", que considera las necesidades de las especies a lo largo del ciclo de vida y es flexible, en función de las condiciones hidrológicas naturales que se verifican año a año. Sin embargo, esto tiene el desafío de establecer y realizar investigaciones cuyo objetivo sea identificar la relación entre ecología e hidrología, también se debe considerar para la implementación del hidrograma ecológico la heterogeneidad de la biomasa existente en Brasil, con diferentes comportamientos climáticos y distintos grados de intervención humana en el recurso hídrico.

Como se dijo anteriormente, este trabajo de título adopta un enfoque hidrológico multiatributo, debido a las necesidades del proyecto y datos que se encuentran disponibles. Se espera recomendar un régimen hidrológico que, como se expresa en Okawa (2009), considere lo que necesitan las especies, en este caso de peces, a lo largo de su ciclo de vida y que sea en función de las condiciones hidrológicas naturales que se verifican año a año.

## 2.2 Métodos hidrológicos

A continuación, se presentan métodos hidrológicos que no solo permiten el cálculo de un caudal mínimo que debe mantenerse en el cauce, sino que incluye otros atributos como las inundaciones, con el fin de generar una serie temporal de valores de caudal que consideren las necesidades de la biota fluvial.

### 2.2.1 IHA, RVA y EFC

Los regímenes hidrológicos juegan un papel importante en la determinación de la composición de la biota, la estructura y función de ecosistemas acuáticos, inundables y riparios (Ritcher et al., 1996). Sin embargo, estos son alterado en gran medida por las intervenciones del hombre, debido a esto se requieren evaluaciones cuantitativas de los cambios inducidos por el ser humano, para poder así, generar diferentes planes de manejo y restauración del ecosistema.

En Ritcher et al. (1996) se propone un método para evaluar el grado de alteración hidrológica, atribuible a alguna intervención humana, como la construcción de un embalse. Este método se denomina indicadores de alteración hidrológica, IHA, por sus siglas en inglés, y se basa en el análisis de datos hidrológicos disponibles, ya sean generados por modelos u obtenidos de puntos de muestreo. Para caracterizar estadísticamente la variación hidrológica de cada año, se utilizan 32 parámetros organizados en cinco grupos:

- Grupo 1: Magnitud de las condiciones hidrológicas mensuales.
- Grupo 2: Magnitud y duración de las condiciones hidrológicas extremas anuales.

- Grupo 3: Momento de las condiciones hidrológicas extremas anuales.
- Grupo 4: Frecuencia y duración de los pulsos altos y bajos.
- Grupo 5: Tasa y frecuencia de los cambios de las condiciones hidrológicas.

Estos parámetros proporcionan información de rasgos ecológicamente significativos, que influyen en el bienestar de los ecosistemas fluviales. Se realiza una comparación de medidas de tendencia central y dispersión para cada parámetro, entre rangos de tiempo definidos como “pre-impacto” y “post-impacto”. Así se puede generar un régimen hidrológico similar al natural ajustando estos índices.

Sin embargo, al año siguiente Richter et al. (1997), propone un nuevo método para caracterizar estadísticamente la variación de los 32 parámetros IHA, no solamente entre un “pre-impacto” y “post-impacto”, sino que también, entre un caudal naturalizado y otro con la alteración antropogénica. El método, denominado método análisis de rango de variabilidad, o RVA, por sus siglas en inglés, selecciona un rango de variación en cada uno de 32 parámetros naturales, como objetivos iniciales de gestión del flujo. Es decir, comienza con una caracterización integral de los atributos de un régimen hidrológico, ecológicamente relevantes, y luego traduce estos, en objetivos de gestión más simples y basados en la hidrología. Estos objetivos se utilizan posteriormente como pautas para diseñar un sistema de gestión viable, capaz de alcanzar las condiciones de caudal deseadas. El RVA es más útil para establecer objetivos preliminares o provisionales, para ríos con regímenes hidrológicos altamente alterados, es decir, donde una o más características del flujo anual cambian.

Finalmente, en Mathews & Richter (2007), a partir de metodologías holísticas desarrolladas en todo el mundo, se agrega la capacidad de calcular las características de cinco componentes del flujo, EFC, por sus siglas en inglés, importantes para la salud del ecosistema fluvial: flujos extremadamente bajos, flujos bajos, pulsos de flujo alto, pequeñas inundaciones y grandes inundaciones. Estos nuevos parámetros se agregaron para complementar los 32 parámetros originales y caracterizar el hidrograma de una manera que sea representativa de las relaciones clave entre caudal y ecología. Esto es aplicado en Green River, Washington, donde se presenta y demuestra un proceso para vincular los resultados de los IHA con un modelo ecológico, y así explorar las relaciones de caudal-ecología dentro de un contexto de manejo adaptativo.

Una ventaja práctica de estos componentes de flujo ambiental es que una prescripción de caudal ambiental basada en ellos se puede implementar fácilmente en la mayoría de los entornos de gestión del agua. Generalmente los IHA se utilizan, de manera independiente, como un generador de índices y estadísticas de un régimen hidrológico, sin embargo, la importancia de estos aumenta cuando se usa interactivamente con modelos ecológicos (Mathews & Richter, 2007).

En resumen, el enfoque índices de alteración hidrología, IHA, nos presenta herramientas para calcular la alteración hidrológica producida por intervenciones del hombre, como también, nos permite poder diseñar un régimen hidrológico basado en necesidades ecológicas, a través de los EFC.

### 2.2.2 Otras metodologías y comparación con IHA

Los investigadores han recibido poca orientación con respecto a la pregunta: ¿Qué subconjunto mínimo de índices hidrológicos disponibles se requiere para describir adecuadamente los aspectos principales del régimen hidrológico? Una respuesta a tal pregunta sería una contribución importante al campo de la investigación fluvial, ya que brindaría a los investigadores un medio para identificar un conjunto de índices hidrológicos que representen características de caudales críticas y muestren adecuadamente la información disponible proporcionada por la población de índices que ha sido desarrollado (Olden et al., 2003). Los indicadores de alteración hidrológica, IHA, mencionados anteriormente, pueden proporcionar una herramienta poderosa para el cálculo de índices, no redundantes y de alta información, que describen los componentes principales del régimen de flujo; sin embargo, como en el caso de todos los índices, sólo un subconjunto de los IHA debe usarse en cualquier análisis.

Olden et al. (2003) proporciona un marco estadístico para ayudar en la selección de índices hidrológicos para futuros estudios hidroecológicos. Al centrarse en las interrelaciones entre los índices hidrológicos, se puede seleccionar un subconjunto de índices óptimos en función de la región hidroclimática en la que se ubica el caudal del estudio y se aborda la cuestión ecológica en particular. Esto maximizará la información proporcionada por los índices seleccionados, al tiempo que minimiza el grado de redundancia en todos los análisis posteriores. Sin embargo, es importante tener en cuenta que, si bien proporcionan una base cuantitativa para la selección de índices hidrológicos, el enfoque sólo debe utilizarse como ayuda para la selección de estos. Siempre que sea posible, se debe utilizar la conjugación con criterios de selección de índice más intuitivos basados en la pregunta ecológica de interés en particular, como lo es en este trabajo de título, favorecer el servicio ecosistémico de producción de peces.

Gao et al. (2018) compara los índices IHA con un enfoque alternativo basado en los indicadores ecoflow. Se utilizan, con el fin de estudiar los cambios en el régimen hidrológico del río Yangtze, para esto se empleó un modelo hidrológico distribuido para simular el régimen natural y separar cuantitativamente los efectos que produce, el funcionamiento del embalse y la variación del clima, en los cambios del régimen hidrológico.

Las métricas de IHA se han utilizado para evaluar las alteraciones hidrológicas en un conjunto de cuencas hidrográficas ubicadas en regiones áridas, semiáridas y húmedas. Sin embargo, estudios anteriores también han llegado a la conclusión de que existe una redundancia estadística en los parámetros de la IHA y que algunos parámetros están correlacionados. Vogel et al. (2007) desarrolló los índices ecoflow que incluyen dos parámetros, ecofdeficit y ecosuperávit, que se basan en las curvas de duración, FDC, por sus siglas en inglés. Las FDC proporcionan una medida del porcentaje de tiempo durante el cual un flujo específico se iguala o supera y describe la gama completa de magnitudes de flujo. Por lo tanto, los índices ecoflow pueden evaluar los cambios en el régimen hidrológico utilizando un método simple. Gao et al. (2009) sugiere que el ecofdeficit y el ecosuperávit son buenas representaciones del grado de alteración hidrológica y se encuentran bien correlacionados con los parámetros de las métricas de IHA.

Gao et al. (2012) y Wang et al. (2017) encontraron que los índices ecoflow pueden describir cambios en los parámetros hidrológicos de los grupos 1 y 2 de los índices IHA, es decir, magnitud de las condiciones hidrológicas mensuales y magnitud y duración de

las condiciones hidrológicas extremas anuales, respectivamente. Este hallazgo brinda la oportunidad de reducir el número de índices utilizados para evaluar los cambios en el régimen hidrológico, a través del uso de los índices ecoflow. Sin embargo, los índices ecoflow generalmente muestran correlaciones débiles con los parámetros restantes de las métricas de IHA.

Otra metodología de enfoque hidrológico se muestra en algunos estudios realizados en el río Paraná, como el de Suzuki et al. (2009) y Marques et al. (2018). En estos se utiliza un software llamado PULSO, es cual fue desarrollado por Sivina Casco, Juan José Neiff & Matías Neiff (2005), en el Centro de Ecología Aplicada del Litoral (Corrientes, Argentina). En la descripción del programa se expresa que los esfuerzos de los ecologistas se han dirigido a conocer el número de especies que habitan en un río y su cuenca. Sin embargo, se ha dedicado un número menor de proyectos para estudiar las causas de la biodiversidad en sistemas con un alto nivel de fluctuación.

En la descripción del software, se discute la información sobre la planicie de inundación del río Paraná y se realiza un avance metodológico para vincular la complejidad biológica e hidrológica que presenta. PULSO es una herramienta para estudiar las fluctuaciones y la deposición de nutrientes en las planicies de inundación, las causas, distribución y abundancia de organismos en ríos y humedales, como también, para analizar los efectos de las inundaciones catastróficas y comprender la estructura actual de los paisajes en sistemas fluctuantes.

Este programa no es un procedimiento para el análisis hidrológico, sino una herramienta para diagnosticar la causa, la estructura o el proceso relacionado con el comportamiento hidrológico fluctuante típico de las planicies de inundación, los humedales inundados periódicamente por la lluvia, las zonas costeras bajo regímenes de marea y la estructura de los ríos con llanuras aluviales. Estos ecosistemas están condicionados por pulsos de energía y materiales o pulsos hidrosedimentológicos (Casco et al 2005).

PULSO funciona con datos hidrométricos o la profundidad de un río o humedal, también se puede utilizar para analizar situaciones o procesos análogos. Es posible conocer el número de pulsos, el número de inundaciones y las fases secas, la estación del año en que se producen, su duración, la magnitud que alcanzaron y la regularidad del régimen. El análisis de los pulsos fluviales tiene lugar para cada sector de la llanura de inundación, ya que su posición topográfica determina el tiempo distinto de la potamofase/limnofase (Casco et al 2005). En cada caso particular, el investigador que utiliza el software PULSO define si las funciones del sistema que analiza, como por ejemplo población de peces, son interferidas o favorecidas por una u otra fase de los pulsos.

Se puede observar que, si bien PULSO es una herramienta que permite estudiar las inundaciones que ocurren, no permite el cálculo de índices que comprenden todas las características que posee un río. Se puede obtener similitudes entre PULSO y los EFC ya que ambos caracterizan inundaciones.

Por otro lado, en Stewardson et al. (2003), se utiliza el método hidrológico flow events. Esta investigación presenta un nuevo enfoque para caracterizar las variaciones de caudal, utilizando el conocimiento de la influencia de los eventos de caudales en procesos biológicos y geomorfológicos. Este enfoque tiene la ventaja de que los beneficios

ecológicos del caudal ambiental están claramente articulados, el conocimiento disponible se incluye en el desarrollo de recomendaciones de caudales y el método explica el dinamismo natural en los procesos de los ecosistemas relacionados con el caudal, utilizando el régimen de flujo natural como una plantilla para el régimen de flujo ambiental.

Según Stewardson et al. (2003), el método RVA, mencionado anteriormente, mejora métodos anteriores al proporcionar un método sistemático de caracterización y contabilidad de la variabilidad hidrológica al planificar un régimen de flujo ambiental. Sin embargo, una limitación de la versión actual del RVA es que no existe un método específico para relacionar la respuesta ecológica con las estadísticas de caudal utilizadas en el método. En particular, la respuesta de las características hidráulicas, geomorfológicas y biológicas a los cambios en el caudal puede ser no lineal y discontinua. La mitad de la descarga máxima no moverá la mitad del sedimento, la mitad de un caudal que promueve la migración no moverá a la mitad de los peces, y la mitad de un caudal que llena la planicie de inundación no inundará la mitad de esta (Poff et al., 1997).

Con el RVA, los cambios en la magnitud del caudal o los cambios en la tasa de cambio del caudal se evalúan sobre la base del cambio hidrológico en lugar de la respuesta hidráulica, geomórfica y ecológica. Es decir, se puede utilizar el método RVA para caracterizar los cambios hidrológicos del río en el tiempo, sin embargo, se debe desarrollar otro para poder conectarlo con las respuestas ecológicas, como el servicio ecosistémico de producción de peces.

El método flow events es un enfoque para desarrollar regímenes de caudal ambiental mediante la identificación explícita de procesos geomorfológicos y biológicos afectados por la variabilidad del caudal. El método utiliza el supuesto de que los efectos de las variaciones de caudal se pueden representar mediante una serie de eventos, cada uno caracterizado por su magnitud. Los flow events se definen utilizando la información disponible con respecto al proceso geomórfico o biológico de interés. Los cambios en el régimen hidrológico se evalúan comparando el intervalo de recurrencia de los eventos de caudal en el régimen hidrológico modificado y en algunos de referencia (Stewardson et al. 2003).

Por otro lado, el primer paso en el método flow events, es identificar los procesos geomorfológicos y biológicos que se ven afectados por las variaciones de caudal. El siguiente, es seleccionar un método para caracterizar eventos individuales de flujo y su distribución en el tiempo. Al diseñar este análisis de series de tiempo es necesario considerar la mejor manera de caracterizar eventos individuales (por ejemplo, el valor máximo o duración del evento), los meses en que los eventos son ecológicamente importantes y si los eventos extremos, los eventos más frecuentes o la distribución de condiciones a lo largo de la temporada, son importantes (Stewardson et al. 2003). Los eventos de flujo se evalúan utilizando parámetros hidráulicos que miden la gravedad del evento. Una vez que se han definido los eventos de flujo, las relaciones entre los parámetros hidráulicos y la descarga se derivan utilizando levantamientos hidráulicos y modelos.

El método tiene algunas ventajas sobre los métodos anteriores, como el RVA, por incorporar variabilidad en los regímenes de caudal ambiental (Stewardson et al. 2003). En particular, este nuevo método proporciona una evaluación de los regímenes basado

en la consideración de los procesos de los ecosistemas en lugar de estadísticas hidrológicas. Este enfoque proporciona una base más sensible para caracterizar las variaciones de caudales. La selección de descargas de umbrales, magnitudes de eventos y períodos durante los cuales se pueden agregar eventos se basa en el conocimiento de escalas de tiempos importantes para los procesos geomórficos o biológicos. Donde falte este conocimiento, los científicos pueden usar un marco teórico para proporcionar directrices para los gerentes junto con una descripción de la incertidumbre en sus consejos. Tal consejo alienta la investigación adicional para reducir la incertidumbre. Los usuarios del método deben usar su juicio al seleccionar procesos y definir eventos de flujo (Stewardson et al. 2003).

La falta de conocimiento sobre los efectos ecológicos de la variabilidad del flujo en grandes escalas de tiempo prohíbe un enfoque totalmente prescriptivo. Sin embargo, los juicios requeridos para el método pueden ser probados para consistencia con los datos disponibles para el sistema fluvial particular. En algunos casos, es posible que no haya datos o conocimiento experto para respaldar el análisis de eventos de caudal. Esta situación se hará evidente durante las decisiones relacionadas con la selección y definición de los eventos de flujo y la interpretación de los resultados. En la documentación del proyecto, debe quedar claro qué recomendaciones se basan en información sólida y los beneficios consiguientes del caudal ambiental tienen un mayor nivel de certeza.

Si bien Stewardson et al. (2003) compara el método flow events con el RVA, para la fecha de su publicación aun no existía la herramienta EFC, la cual, si puede definir eventos de flujo, como inundaciones, para luego poder relacionarla con información sobre la biología o geomorfología del lugar. El método RVA se utiliza en el presente estudio solo con el fin de definir el alcance de las alteraciones a los regímenes naturales de caudales.

### 2.2.3 Reciente aplicación de IHA

Nascimento do Vasco et al. (2018) utiliza los índices IHA en el mismo país que se estudia en esta memoria, Brasil. El objetivo de este estudio fue determinar los cambios en el régimen hidrológico durante los períodos anteriores y posteriores a la construcción del embalse de Xingo en el río Sao Francisco y relaciona estos cambios con algunas implicaciones ecológicas. Para esto, utilizó el método de indicadores de alteración hidrológica, IHA, y el método de componentes de flujo del entorno, EFC.

El uso de indicadores de cambios hidrológicos permitió efectivamente la verificación de una modificación extensa en la hidrología del bajo río Sao Francisco (Nascimento do Vasco et al., 2019). Los principales cambios están relacionados con la regulación de los caudales, establecidos por la operación de la central hidroeléctrica de Xingo. Hubo una reducción de 31%, 21% y 35% respectivamente para el caudal promedio, mínimo y máximo en comparación con el período de estudio. Las inundaciones que a menudo se produjeron en la parte baja del río Sao Francisco dejaron de ser significantes y causaron varios efectos, incluida la reducción del número de lagunas y el refugio de varias especies acuáticas. El registro creciente de caudales bajos y extremadamente bajos en el período posterior a la construcción de la central hidroeléctrica de Xingo, es una preocupación para el bajo río Sao Francisco, ya que disminuye la disponibilidad de agua en la región, dificulta la navegación y fomenta el avance del mar sobre el río, cambiando todo el ecosistema.

## 2.3 Métodos hidrológicos con meta ecológica

Existen metodologías que mezclan indicadores hidrológicos con alguna meta ecológica específica, como aumentar la cantidad de ciertos tipos de peces, generando así condiciones en el río que benefician particularmente a estas especies y que, a menos que sean nativas, no son necesariamente las naturales. A diferencia de los métodos nombrados anteriormente, como el RVA, ecoflow y flow events, que toman el enfoque de que el régimen natural o pre-impacto es el ideal para mantener un ecosistema fluvial saludable.

En Yang et al (2008) se desarrolla un nuevo enfoque para identificar indicadores hidrológicos relacionados con la comunidad de peces y generar una función cuantitativa entre un índice de objetivos ecológicos y los indicadores hidrológicos identificados. El enfoque se basa en la programación genética (GP), un método de minería de datos. Usando el Índice de Shannon (un índice de diversidad de la comunidad de peces) o el número de individuos (abundancia total) de una comunidad de peces, como un objetivo ecológico, el GP identificó los indicadores hidrológicos más relevantes desde el punto de vista ecológico (ERHI) de 32 indicadores de alteración hidrológica, para el sitio de estudio de ese caso, el río Illinois superior. El análisis de robustez mostró que diferentes carreras de GP encontraron un conjunto similar de ERHI; cada uno de los ERHI identificados de diferentes ejecuciones de GP tuvo una relación consistente con el índice objetivo.

Al comparar los resultados de GP con los del análisis de componentes principales y la matriz de autecología, los tres enfoques identificaron un pequeño número (seis) de ERHI comunes. En particular, el momento del caudal bajo parece ser más relevante para la diversidad de la comunidad de peces, mientras que la magnitud del caudal bajo es más relevante para la abundancia total de peces; las elevadas tasas de aumento resultan en una mejora significativa de la diversidad de peces, que es contra intuitiva y contraria a los resultados anteriores del estudio. La función cuantitativa desarrollada por GP se usó para construir una matriz de impacto de indicadores (IIM), que se demostró como una herramienta potencialmente útil para el diseño de restauración de caudal.

Entre los efectos ambientales causados por las represas, la alteración de los regímenes hidrológicos es uno de los más críticos para los ecosistemas fluviales. Siempre que sea técnicamente viable, la reoperación de los sistemas de reservorios hidroeléctricos puede, en un principio, mitigar los efectos en los ecosistemas de agua dulce degradados, mediante la recuperación de parte del régimen hidrológico natural (Marques G. F. et al., 2018). El enfoque típico para realizar lo anterior se centra en la reoperación de la presa ubicada inmediatamente aguas arriba del área ambientalmente sensible, lo que significa que solo una central eléctrica será la más afectada por los beneficios perdidos para el sector energético. Al ignorar la contribución de las infraestructuras aguas arriba a la alteración del régimen de flujo, el costo de oportunidad asociado con la restauración de un régimen hidrológico no se distribuye equitativamente entre las compañías de energía en la cuenca fluvial. Sin embargo, no existe un criterio ni mecanismos institucionales para asegurar una distribución justa del costo de oportunidad entre las centrales eléctricas.

El estudio de Marques G. F. et al. (2018) se realiza en la parte alta del río Paraná y utiliza los caudales ecológicos en base a la investigación de Suzuki et al. (2009). En este último,

se identifican y caracterizan los atributos hidrográficos relacionados con el éxito del reclutamiento de peces migratorios en la llanura de inundación del Paraná Alto. Para lograr los objetivos, analizaron las variaciones interanuales en la abundancia de juveniles del año (YOY; índice de reclutamiento) de seis especies migratorias y sus relaciones con los atributos hidrográficos. El reclutamiento se relaciona con la intensidad, la duración (en diferentes niveles fluviométricos), la elasticidad, el número de pulsos, el mayor desbordamiento ininterrumpido y el retraso de las inundaciones (todos obtenidos mediante el software PULSO).

Las recolecciones de peces se realizaron en el período comprendido entre enero de 1987 y noviembre de 2007 en distintos ambientes (canales de ríos, canales secundarios y lagos de inundación conectados y desconectados) distribuidos a lo largo de tres subsistemas (Paraná, Baía e Ivinheima). Las relaciones entre el reclutamiento y los atributos de interés se determinaron a través de análisis de covarianza. En el período estudiado, las mayores abundancias de YOY se registraron en 2007, seguidas de 1992, 1993, 2005 y 1988. La abundancia de YOY se correlacionó positivamente con una intensidad de niveles altos de agua (potamofase) y la duración de esta y negativamente con la duración de niveles bajos de agua (limnofase) y un retraso de la inundación. Los niveles hidrométricos más altos y el mayor desbordamiento ininterrumpido presentaron diferentes relaciones entre los subsistemas, pero todos con efectos positivos en el reclutamiento.

Los resultados evidenciaron que el reclutamiento respondió mejor cuando las inundaciones comenzaron en enero con intensidades de potamofase superiores a 610 cm y niveles de agua superiores a 450 cm durante un período de 50 días y se repite cada dos años (o es mayor a 610 cm durante 38 días y se repite cada dos o tres años). Por lo tanto, el control artificial de las inundaciones a intervalos de dos o tres años, mediante la manipulación de la descarga de presas ubicadas aguas arriba de la llanura de inundación de manera de promover potamofases con el potencial de asegurar el reclutamiento de especies migratorias, puede convertirse en una herramienta importante para la conservación de los peces migratorios (Suzuki et al. 2009).

Por otro lado, en Agostinho et al. (2004), se explica que el régimen de inundación es la fuerza más importante que determina la estacionalidad en los ríos neotropicales. Los ciclos biogeoquímicos en la llanura de inundación del Alto Paraná están fuertemente influenciados por aumentos periódicos en el nivel del agua. Además del intercambio directo de nutrientes resultante de esta dinámica, las inundaciones promueven pulsos de nutrientes, debido a la descomposición de la vegetación inundada en la llanura de inundación. El régimen de inundación del río Alto Paraná es el factor principal que influye en la vida de los peces, la ecología y la pesca regional (Agostinho et al., 2000, 2001). El ciclo hidrológico desempeña un papel importante en la señalización de diversos atributos biológicos, como la maduración de las gónadas, la migración, el desove y el desarrollo larvario, el crecimiento y la alimentación (Gomes y Agostinho, 1997).

Agostinho et al. (2004) recolecta peces en diferentes hábitats de la llanura de inundación del río Paraná superior (río, canales y lagunas) en el período de 1986 a 2001. La variación anual en el hidrograma afecta a las especies con distintas estrategias de vida de manera diferente e influye en la composición y estructura de los conjuntos de peces. Grandes inundaciones se asociaron con una mayor riqueza de especies. Las frecuencias de individuos con gónadas maduras y parcialmente gastadas, que indican el desove, fueron

mayores durante el período de aumento del nivel del agua. La dependencia de las inundaciones parece ser más baja en las especies sedentarias que desarrollan el cuidado parental, y más alta en las grandes especies migratorias que desovan en los tramos superiores de la cuenca y usan áreas inundadas como viveros.

Los peces migratorios se vieron favorecidos por las inundaciones anuales que duraron más de 75 días, con inundaciones más largas que produjeron poblaciones más grandes. La aparición de altos niveles de agua al comienzo del verano es fundamental para el éxito de desove de las especies migratorias. Sin embargo, la inundación puede ser menos importante para el reclutamiento de juveniles si es de corta duración.

La regulación del flujo por las represas aguas arriba ha modificado la estructura y la función de la llanura de inundación del río Paraná Superior y ha impactado negativamente la fauna de peces (Agostinho et al., 2000, 2003). Por lo tanto, el manejo de la cantidad y calidad del agua que pasa a través de las presas para mantener la hidrología cerca del régimen natural tiene un gran potencial para reducir los impactos en los ensambles de peces. Sin embargo, la eficacia de la gestión del flujo requiere información detallada sobre su efecto sobre el funcionamiento de la llanura de inundación y las respuestas de ensamblaje. Agostinho (2004) presenta información sobre la influencia de las inundaciones controladas por embalses en algunos atributos de ensamblaje de peces, reproducción y reclutamiento en la llanura de inundación del río Alto Paraná, proporcionando pautas preliminares para la operación de la presa aguas arriba, como que la operación de la presa aguas arriba (liberando más agua durante la temporada de lluvias) tiene el potencial de promover mayores inundaciones con la duración adecuada, mejorando el reclutamiento, particularmente para las especies migratorias.

Así, podemos observar que distintos índices o eventos hidrológicos particulares, como las inundaciones, pueden relacionarse con información que promueve la producción de peces. También, datos como la abundancia de peces o diversidad se pueden relacionar con distintos índices, con el fin de seleccionar solo un grupo de estos y manipularlos para lograr un régimen hidrológico que beneficie el servicio de producción de peces.

Finalmente, el reconocimiento de la creciente alteración hidrológica de los ríos a escala global y la degradación ambiental resultante, ha llevado al establecimiento de la ciencia de la evaluación del caudal ambiental, mediante la cual se determina la cantidad y calidad del agua requerida para la conservación del ecosistema y la protección de los recursos. Desde los años sesenta, se ha reconocido que las fluctuaciones hidrométricas de los ríos constituyen el macrofactor más importante para explicar la riqueza, distribución y abundancia de los organismos que viven en ellos.

En esta investigación, con el fin de recomendar un régimen hidrológico para el sector de Paraná alto en Brasil, que beneficie el servicio ecosistémico de producción de peces, se adopta un método hidrológico, específicamente los desarrollados por Ritcher et al. a través de los años, es decir, los métodos IHA, RVA y EFC. Estos métodos nos permiten cuantificar la alteración hidrológica causada por los embalses de hidroeléctricas, como también, poder estudiar los eventos de caudal que se vinculan con la producción de peces, a través de su relación con información sobre su ensamblaje, presentada en Suzuki et al. (2009) y Agostinho et al. (2004).

## 3. Antecedentes

### 3.1 Proyecto

El trabajo de título forma parte del proyecto titulado “Improving the governance of the floodplain in over-built river basins” financiado por el Inter-American Institute for Global Change Research. El trabajo técnico central es desarrollado por los socios académicos: UFRGS (Brasil), UEM (Brasil), UL (Canadá) y UCH (Chile) y los socios institucionales: comité de cuenca (CBHP) y agencia de gestión del agua (ANA).

Este proyecto tiene como objetivo principal mejorar la gobernanza de la planicie de inundación en cuencas fluviales sobre construidas, donde el sustento de las comunidades ribereñas está en riesgo, debido a la degradación de los ecosistemas y las instituciones fragmentadas. La hipótesis del trabajo es que el sustento de las comunidades locales puede mejorar si los servicios ecológicos claves, como la producción de peces, son restaurados al menos parcialmente, y si los beneficios y costos correspondientes son compartidos equitativamente. Junto con la reoperación de un sistema de múltiples embalses, existen otros desafíos asociados con la distribución equitativa del costo de oportunidad correspondiente, entre las compañías eléctricas y operadores de los embalses. Lo anterior toma lugar en la parte alta del río Paraná y se realiza a través de seis etapas:

1. Establecer los vínculos entre los usuarios y los servicios del ecosistema.
2. Comprender la respuesta de los servicios clave del ecosistema al cambio en el régimen hidrológico.
3. Identificar los regímenes hidrológicos deseados que mejoran los servicios clave del ecosistema.
4. Determinar las restricciones operativas del embalse.
5. Desarrollar mecanismos de costo compartido.
6. Elaborar políticas de gestión del agua e instrumentos institucionales.

El presente trabajo forma parte de la tercera etapa.

### 3.2 Zona de estudio

El río Paraná ocupa el décimo lugar en caudal en el mundo y es la segunda cuenca más grande de Sudamérica. El Paraná alto, comprende el tercio superior de esta cuenca, con un área de 891.000 km<sup>2</sup>, 10,5% de la superficie total de Brasil. (Marques H. et al., 2018).

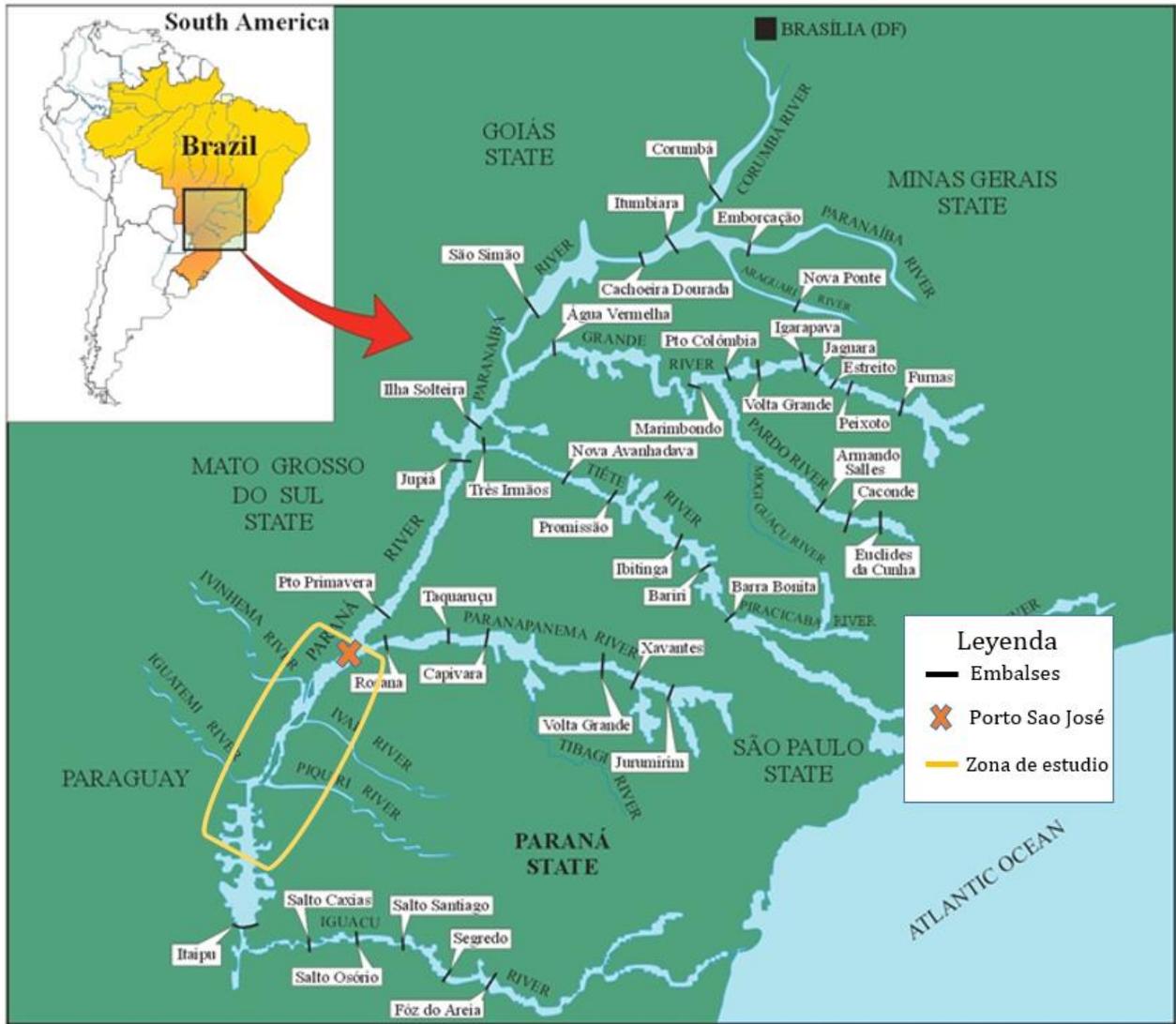


Figura 3.1. Cuenca del río Paraná alto, embalses mayores y ubicación del área de estudio. Fuente: modificado de Agostinho et al. (2004).

En el Paraná alto se encuentra una llanura de inundación de 230 km de largo en su sección suroeste, entre la presa del embalse de Porto Primavera y la presa de Itaipú, alcanzando 20 km de ancho en el margen occidental del río Paraná. Esta es la zona de estudio y para la cual se diseña el régimen hidrológico, específicamente se obtienen datos hidrológicos de Porto Sao José (ver Figura 3.1). Este representa el último tramo sin represas del río Paraná, dentro del territorio brasileño (Suzuki et al., 2009).

Este tramo de llanura de inundación tiene una gran diversidad de hábitats que incluye la llanura aluvial con numerosos canales secundarios, lagos y las secciones de los canales principales del río Paraná, el río Baía y el río Ivinhema. El canal principal del río Paraná tiene otros tres grandes embalses aguas arriba del área de estudio y la mayoría de sus afluentes están fuertemente represados, lo que constituye una cascada de embalses (Granzotti et al., 2018).

La dinámica de las inundaciones en la llanura de inundación del río Paraná superior es compleja. La estación húmeda generalmente ocurre de noviembre a mayo, pero suele ocurrir más de un pulso de inundación durante esta fase. El pulso de inundación es crítico en términos de mantener la alta biodiversidad de la llanura de inundación. La estación seca generalmente ocurre de junio a octubre. Las fluctuaciones anuales en el nivel del agua son en promedio de unos 2,5 m (Agostinho et al. 2000), pero se han registrado fluctuaciones de hasta 7,5 m, así como años sin inundaciones. La precipitación anual promedio alcanza los 1500 mm, caracterizando el clima de la región como tropical-subtropical (Agostinho et al. 2004). Los entornos lénticos incluyen lagos de llanuras aluviales; algunos se conectan al río todo el año, mientras que otros están aislados y conectados indirectamente al río por aguas subterráneas o solo durante inundaciones. El canal principal del río Paraná representa ambientes lénticos.

Por otro lado, para el cálculo de la alteración hidrológica, se estudian los caudales entregados por los embalses que se encuentran inmediatamente aguas arriba de la zona de estudio, es decir, Porto Primavera y Rosana (ver *Figura 3.1*).

Se analizan los caudales entregados por Porto Primavera con el fin de cuantificar la alteración producida por este y todos los embalses que se encuentran hacia aguas arriba, a través del río Paraná y sus afluentes.

El embalse Porto Primavera se encuentra en una llanura de inundación aluvial del río Paraná. Entró en funcionamiento en marzo de 1999, para la generación de energía hidroeléctrica. El embalse se llenó en dos etapas; la primera (elevación de 253 m) se completó en diciembre de 1998, y la segunda (elevación de 257 m) se completó en marzo de 2001. Según el área, Porto Primavera es el embalse más grande de la cuenca del Paraná, con una longitud de 270 km, una superficie de 2.040 km<sup>2</sup>, y una profundidad promedio de 6,8 m; Además, drena una cuenca de 572.480 km<sup>2</sup> (Marques H. et al., 2018). La planta de energía opera con pequeñas variaciones en el nivel del agua (menores a 0,4 m) y una descarga promedio a largo plazo de 6.981 m<sup>3</sup>/s, con un tiempo promedio de residencia del agua de 33,9 días (Marques H. et al., 2018).

También, se estudian los caudales entregados por el embalse Rosana, de manera que se pueda cuantificar la alteración producida sólo por los embalses que se encuentran hacia aguas arriba de este, por el río Paranapanema, ya que este es el único afluente después de Porto Primavera, que se encuentra intervenido.

La cuenca del río Paranapanema tiene un área de 106.500 km<sup>2</sup>. Sus aguas fluyen aproximadamente 930 km tierra adentro, hacia el oeste, hasta que desembocan en el lado izquierdo del río Paraná (Jarduli et al., 2019). El Embalse Rosana, terminó su construcción en 1986, tiene un área de drenaje de 99.000 km<sup>2</sup> y un tiempo de residencia del agua de 18,6 días. La superficie del embalse es de 220 km<sup>2</sup>, la longitud es de 116 km y el volumen es de 1.920 × 10<sup>6</sup> km<sup>3</sup>. El embalse de Rosana es el último en una cascada de nueve embalses en el río Paranapanema y ha sido clasificado como el más oligotrófico de estos (Pereira et al., 2019).

### 3.3 Información sobre peces

Las especies de peces migratorios, de la región neotropical, son caracterizados por su gran tamaño, amplia gama de hogares y estrecha dependencia de los procesos vinculados al reclutamiento (migración, desove y desarrollo inicial) con el régimen de inundación. Estas características hacen que los peces migratorios sean particularmente vulnerables a la fragmentación del hábitat y al control del régimen de inundaciones estacionales, que resultan por la construcción de represas (Agostinho et al., 2005; Agostinho et al., 2008). Debido a su alto valor comercial, cualquier impacto de las represas sobre las poblaciones de peces migratorios es preocupante, con implicaciones para la diversidad y grupos sociales que dependen de la pesca para mantener sus medios de vida (Okada et al., 2005).

Los servicios ecosistémicos son la contribución directa e indirecta de los ecosistemas al bienestar humano (TEEB, 2010) y según la clasificación propuesta por la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (MEA, 2005) se clasifican en cuatro grupos:

- Provisión: por ejemplo, de madera, agua, alimentos.
- Regulación: por ejemplo, control de inundaciones y de pestes.
- Soporte: por ejemplo, el ciclo de nutrientes.
- Culturales: por ejemplo, espirituales y de recreación.

Por esto, el servicio ecosistémico de provisión que se requiere favorecer, con el fin de que mejore la pesca, es la producción de peces migratorios, los cuales combinado con la biodiversidad también contribuyen a los servicios de turismo y recreación, importantes para la economía local.

En el río Paraná superior, las especies migratorias requieren al menos tres tipos de hábitats para completar sus ciclos de vida (Pelicice y Agostinho, 2008). Necesitan un hábitat de desove (tramo superior de los afluentes del río Paraná), un hábitat de desarrollo inicial ("várzeas", en tramos inferiores de afluentes y márgenes del río Paraná), y hábitats para el crecimiento y alimentación (toda la cuenca). El aumento de los niveles de los ríos está relacionado a la migración y al desove, y las áreas inundadas incrementan la disponibilidad de refugio y comida en las etapas iniciales de desarrollo, afectando positivamente el reclutamiento de las poblaciones adultas (Bailly et al., 2008).

Suzuki et al. (2009) realiza muestreos de peces desde enero de 1987 a noviembre de 2007 y en tres fases (enero de 1987 a septiembre de 1988; marzo de 1992 a diciembre de 1994 y febrero de 2000 a noviembre de 2007). Los muestreos se efectuaron mensualmente en 1987-1988 y en 1992-1993; cada dos meses en 1994; y cada tres meses en el último período (2000-2007). En este estudio, los juveniles del año (YOY) son los individuos que poseen una longitud más pequeña que la estimada para un año de edad. Debido al bajo número de estudios de crecimiento y la baja abundancia de algunas especies, solo se consideran en el análisis los peces *Prochilodus lineatus*, *Leporinus obtusidens*, *Pimelodus maculatus*, *Pseudoplatystoma corruscans*, *Pterodoras granulosus* y *Salminus brasiliensis*. Esta información se presenta en la *Figura 3.2* como un gráfico de captura por unidad de esfuerzo, CPUE, de las seis especies de peces migratorios mencionadas para cada año donde se obtuvieron mediciones.

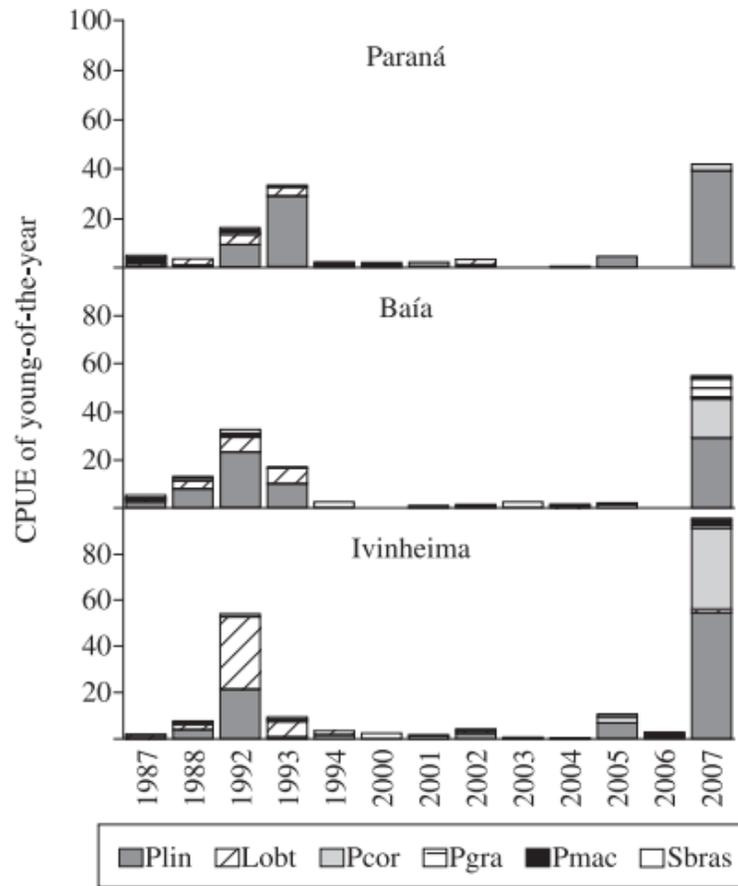


Figura 3.2. Abundancia (captura por unidad de esfuerzo - CPUE) de seis especies de peces migratorios capturados en la llanura aluvial del Alto Paraná en los diferentes años (1987-2007) y subsistemas (Paraná, Baía e Ivinheima). Fuente: Suzuki et al (2009).

## 4. Metodología

### 4.1 Estudio de métodos de análisis del régimen hidrológico.

En primera instancia se estudian bibliográficamente los métodos que existen para analizar el caudal que debiese mantenerse en un río, dentro de los que se encuentran los hidrológicos, de hábitat o hidráulicos.

Luego el análisis se enfoca en el método que se requiere utilizar en este trabajo de título, el hidrológico multiatributo, que permite analizar un régimen hidrológico, a través de múltiples atributos y no solo un caudal mínimo. Se estudian los datos que cada método hidrológico necesita y los resultados que estos entregan. También, se analizan los alcances de estas metodologías y sus aplicaciones recientes.

### 4.2 Elección de método de análisis

Se selecciona el método de análisis más apropiado para el caso de estudio, teniendo en cuenta los datos que se tienen disponibles y los resultados que el proyecto necesita.

Se adoptan los índices IHA, Richter et al. (1996), para realizar el diagnóstico de la alteración hidrológica producida por los embalses aguas arriba de la zona. Este método necesita datos de caudales diarios y entrega como resultado 32 índices anuales, organizados en cinco grupos, para caracterizar estadísticamente la variación hidrológica.

Sin embargo, los índices se calculan con el Software IHA 7.1, creado por The Nature Conservancy, el cual entrega como resultado 33 índices anuales, organizados en cinco grupos (ver Tabla 4.1). A diferencia de los índices publicados en Richter et al. (1996), se incluyen en el grupo 2 de parámetros IHA los índices “cantidad días con caudal cero” e “índice de caudal base”. También en el grupo 5 se cambia el índice “numero de subidas” y “numero de caída” por el “cantidad de inversiones”.

Tabla 4.1. *Lista de los grupos de índices de alteración hidrológica y los parámetros hidrológicos que los definen. Fuente: The Nature Conservancy (2011).*

| Grupo de parámetros IHA                               | Parámetros hidrológicos                                 |
|---|---|
| 1. Magnitud de las condiciones hidrológicas mensuales | Valor de la media o la mediana para cada mes calendario |
|   | Subtotal 12 parámetros                                  |

|   |   |
|---|---|
| 2. Magnitud y duración de las condiciones hidrológicas extremas anuales | Mínimos anuales, media de 1 día<br>Mínimos anuales, medias de 3 días<br>Mínimos anuales, medias de 7 días<br>Mínimos anuales, medias de 30 días<br>Mínimos anuales, medias de 90 días<br>Máximos anuales, media de 1 día<br>Máximos anuales, medias de 3 días<br>Máximos anuales, medias de 7 días<br>Máximos anuales, medias de 30 días<br>Máximos anuales, medias de 90 días<br>Cantidad de días con caudal cero<br>Índice de caudal base: caudal mínimo de 7 días/caudal medio anual |
|   | Subtotal 12 parámetros  |
| 3. Momento de las condiciones hidrológicas extremas anuales             | Fecha juliana de cada máximo anual de 1 día<br>Fecha juliana de cada mínimo anual de 1 día  |
|   | Subtotal 2 parámetros   |
| 4. Frecuencia y duración de los pulsos altos y bajos                    | Cantidad de pulsos bajos en cada año hidrológico<br>Media o mediana de la duración de los pulsos bajos (días)<br>Cantidad de pulsos altos en cada año hidrológico<br>Media o mediana de la duración de los pulsos altos (días)  |
|   | Subtotal 4 parámetros   |
| 5. Tasa y frecuencia de los cambios de las condiciones hidrológicas     | Tasas de ascenso: Media o mediana de todas las diferencias positivas entre valores diarios consecutivos<br>Tasas de descenso: Media o mediana de todas las diferencias negativas entre valores diarios consecutivos<br>Cantidad de inversiones hidrológicas   |
|   | Subtotal 3 parámetros   |
|   | Total 33 parámetros   |

Para el diseño del régimen hidrológico se calculan 34 índices anuales para cinco tipos diferentes de componentes del caudal ecológico, EFC, caudales bajos, caudales extremadamente bajos, pulsos de caudal alto, pequeñas inundaciones y grandes inundaciones (ver Tabla 4.2). Se necesitan datos de caudales diarios.

Tabla 4.2. Lista de componentes del caudal ecológico, definición y parámetros hidrológicos que los definen. Fuente: Mathews & Richter (2007).

| Componentes del caudal ecológico | Definición predeterminada   | Parámetros hidrológicos   |
|----------------------------------|---|---|
| Caudales extremadamente bajos    | Percentil 10 de los caudales bajos diarios  | Frecuencia de los caudales extremadamente bajos durante cada año hidrológico o estación<br>Valores de la media o la mediana de eventos de caudal extremadamente bajo:<br>· Duración (días)<br>· Pico del caudal (caudal mínimo durante el evento)<br>· Momento (fecha juliana del pico del caudal)                              |
|                                  |   | Subtotal 4 parámetros   |
| Caudales bajos                   | Caudales menores al percentil 75  | Valores de la media o la mediana de los caudales bajos durante cada mes calendario  |
|                                  |   | Subtotal 12 parámetros  |
| Pulsos de caudal alto            | Caudales mayores que el bajo pero menor al nivel de cauce lleno (inundación de periodo de retorno 2 años)             | Frecuencia de los pulsos de caudal alto durante cada año hidrológico o estación<br>Valores de la media o la mediana de eventos de pulso de caudal alto:<br>· Duración (días)<br>· Pico del caudal (caudal máximo durante el evento)<br>· Momento (fecha juliana del pico del caudal)<br>· Tasas de crecimiento y decrecimiento  |
|                                  |   | Subtotal 6 parámetros   |
| Inundaciones pequeñas            | Caudales iguales o mayores que el nivel de cauce lleno pero menor que la inundación con periodo de retorno de 10 años | Frecuencia de las pequeñas inundaciones durante cada año hidrológico o estación<br>Valores de la media o la mediana de eventos de pequeñas inundaciones:<br>· Duración (días)<br>· Pico del caudal (caudal máximo durante el evento)<br>· Momento (fecha juliana del pico del caudal)<br>· Tasas de crecimiento y decrecimiento |
|                                  |   | Subtotal 6 parámetros   |

|                      |  |   |
|----------------------|--|---|
| Grandes inundaciones | Caudales iguales o mayores la inundación con periodo de retorno de 10 años | Frecuencia de las grandes inundaciones durante cada año hidrológico o estación<br>Valores de la media o la mediana de eventos de grandes inundaciones:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>· Duración (días)</li> <li>· Pico del caudal (caudal máximo durante el evento)</li> <li>· Momento (fecha juliana del pico del caudal)</li> <li>· Tasas de crecimiento y decrecimiento</li> </ul> |
|                      |  | Subtotal 6 parámetros   |
|                      |  | Total 34 parámetros   |

### 4.3 Recopilación de datos

Se recopilaron series de caudales diarios para tres puntos de la zona de estudio, efluentes del embalse Porto Primavera, efluentes del embalse Rosana y en Porto Sao José. La serie de caudales diarios medidos se obtiene desde el sistema Hidroweb de la agencia nacional de aguas de Brasil ([www.ana.gov.br](http://www.ana.gov.br)), ANA, específicamente de las siguientes estaciones fluviométricas:

- Porto Sao José: Se obtienen datos para los años 1964- 2014.
- Barramento Porto Primavera: Se obtienen datos para los años 1998-2018.
- Barramento Rosana: Se obtienen datos para los años 1993-2018.

Con estas tres series, llamadas series de caudales alterados, se caracteriza el régimen hidrológico alterado de cada sitio, ya que se midieron en el lugar y percibe las alteraciones producida por los embalses. Se generan curvas de variación estacional y curvas de duración. También se calculan los índices IHA y EFC alterados.

Por otro lado, con el fin de separar los efectos en el régimen hidrológico causados por el cambio climático y la creación y operación de los embalses, no se comparan los caudales pre-impacto y post-impacto, sino que se comparan los caudales post- impacto con un régimen de caudales naturalizado sintético, que debiese haber en ese mismo rango de tiempo, teniendo ambos en cuenta el clima en esos años.

Se obtienen series de caudales naturalizados, para Porto Primavera y Rosana, y se estima el de Porto Sao José como la suma de estos. Las siguientes series se obtienen desde el Operador nacional del sistema eléctrico de Brasil, ONS:

- Porto Sao José ONS: Se obtienen datos para los años 1931-2018.
- Porto Primavera ONS: Se obtienen datos para los años 1931-2018.
- Rosana ONS: Se obtienen datos para los años 1931-2018.

Con estas tres series, llamadas series de caudales naturales, se caracteriza el régimen hidrológico natural de cada lugar, generando así curvas de variación estacional y curvas de duración. También se calculan los índices IHA y EFC naturales.

Se verifican las tres series ONS, y el supuesto de que el caudal en Porto Sao José es la suma del entregado por Porto Primavera y Rosana, con los caudales naturales calculados por el modelo MGB. Este es un modelo hidrológico de lluvia y escorrentía para cuencas hidrográficas a gran escala, desarrollado por el grupo de investigación de hidrología a gran escala del Instituto de pesquisas hidráulicas de la universidad Federal do Rio Grande do Sul, que se ha aplicado a varias cuencas sudamericanas en los últimos años.

- Porto Sao José MGB: Se obtienen datos para los años 1980- 2010.
- Porto Primavera MGB: Se obtienen datos para los años 1980- 2010.
- Rosana MGB: Se obtienen datos para los años 1980- 2010.

#### 4.4 Diagnóstico con respecto a la alteración hidrológica del río

El cálculo de los 33 índices IHA se realizó utilizando el Software IHA 7.1, creado por The Nature Conservancy. Este cálculo se realizó para las tres series de caudales alterados y las tres series de caudales naturales, entre los mismos años.

Para ver como varían los índices, mencionados anteriormente, entre el caso del caudal real que hay en los puntos de estudio después de la construcción de los embalses y el caso del caudal natural que tendría este punto si en la cuenca no existieran alteraciones, se utiliza el método análisis de Rango de Variabilidad, RVA.

En el análisis RVA, la gama completa de índices IHA, calculados con la serie de caudales naturales, se divide en tres categorías diferentes. Los límites entre las categorías se basan en valores de percentiles, ya que es un análisis no paramétrico. La configuración predeterminada por el software en el análisis RVA no paramétrico ubica los límites de las categorías a 17 percentiles de la mediana, esto produce una demarcación automática de las tres categorías de igual tamaño, para cada uno de los 33 índices:

- Categoría baja: valores entre los percentiles 0-33.
- Categoría media: valores entre los percentiles 33-67.
- Categoría alta: valores entre los percentiles 67-100.

Luego se calcula la frecuencia esperada con la cual los valores de los índices IHA, ahora calculados con la serie de caudales alterados, deberían caer dentro de cada categoría. Esto se hace, dividiendo la cantidad de años para los que se calcularon los índices, en el número de categorías, es decir, tres (si el número es múltiplo de tres, si no, las tres frecuencias esperadas no quedan exactamente iguales, ya que esta debe ser un número entero). Luego, el programa calcula la frecuencia con la cual los valores de los índices IHA para la serie de caudales alterados, realmente caen dentro de cada una de las tres categorías.

El análisis RVA genera, para cada índice y categoría, factores de alteración hidrológica (HA, por sus siglas en inglés), que cuantifica el grado de alteración de los 33 índices IHA, los cuales se calculan como:

$$HA = (\text{Frecuencia observada} - \text{Frecuencia esperada}) / \text{Frecuencia esperada}$$

Un valor positivo de alteración hidrológica significa que la frecuencia de los valores en la categoría ha aumentado entre las series alteradas y naturales, mientras que un valor negativo significa que la frecuencia de los valores ha disminuido.

#### 4.5 Selección de atributos y recomendación del régimen hidrológico

Se calculan 34 índices anuales EFC para cinco tipos diferentes de componentes del caudal ecológico, utilizando el Software IHA 7.1. Esto se realiza con la definición predeterminada por el software para calcular cada componente del caudal (Tabla 4.2).

Por otro lado, a partir de diferentes estudios de biólogos de la zona, como los de Suzuki et al. (2009) y Agostinho et al. (2004, 2005 y 2008), se identifica bibliográficamente el componente del caudal importante para la producción de peces. Se vuelven a calcular seis índices, solo para el componente mencionado anteriormente. Basándose en el paper de Suzuki et al. (2009), se calculan otros tres índices que según sus conclusiones son de interés y no se encuentran en el Software IHA 7.1.

De los índices que caracterizan el régimen hidrológico y se relacionan con la producción de peces y basándose en las conclusiones del paper de Suzuki et al (2009), se seleccionan cuatro índices. Para los cuatros índices naturales se calculan los límites RVA, para definir el alcance de las alteraciones al régimen hidrológico natural.

## 5. Resultados

### 5.1 Análisis preliminar

A continuación, se presenta un análisis preliminar de las series de caudales recopiladas a partir de las cuales, posteriormente, se calcularán los índices de alteración. Se presentan los años y el lugar donde se midió o modeló cada serie.

#### 5.1.1 Series de caudales naturales entregadas por el ONS.

En las Figuras 5.1, 5.2 y 5.3 se presentan las series de caudales naturales para Porto Primavera, Rosana y Porto Sao José, respectivamente, durante los años 1931-2018. Se observan sus máximos, mínimos y variabilidad a través del tiempo. El menor caudal medio, máximos y mínimos ocurren en Rosana y el mayor en Porto Sao José. La variabilidad de Porto Primavera es anual y similar a la de Porto Sao José, sin embargo, la de Rosana difiere con las anteriores.

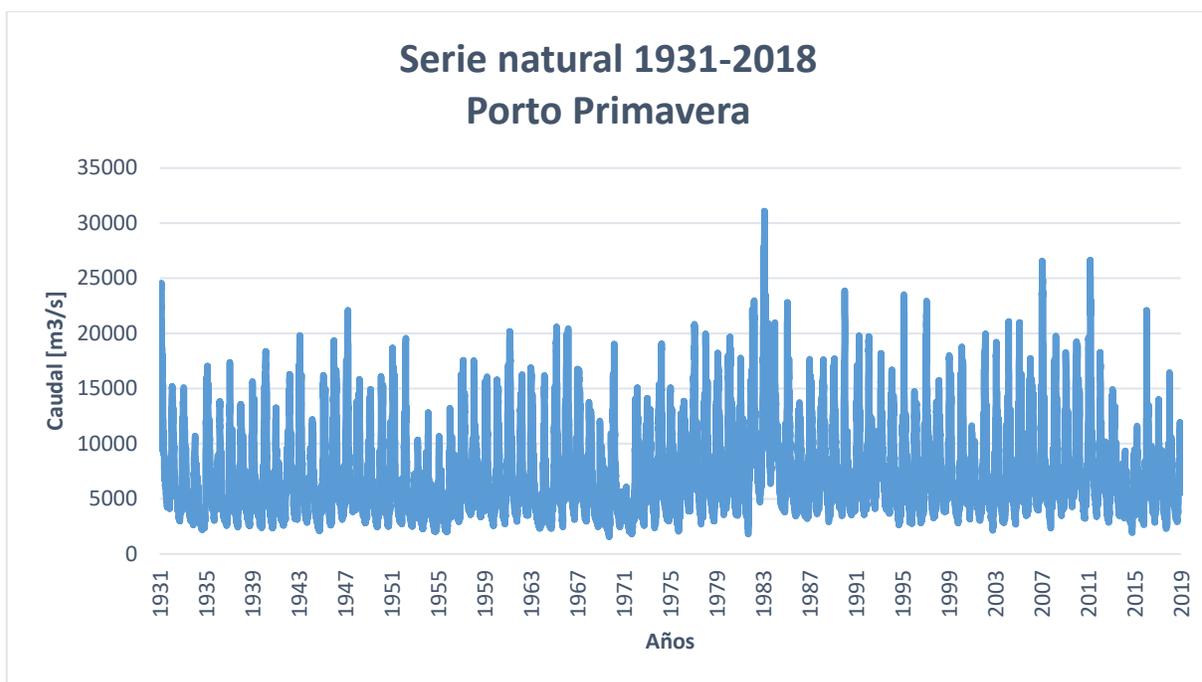


Figura 5.1. Serie de caudales naturales para Porto Primavera, entre los años 1931-2018.

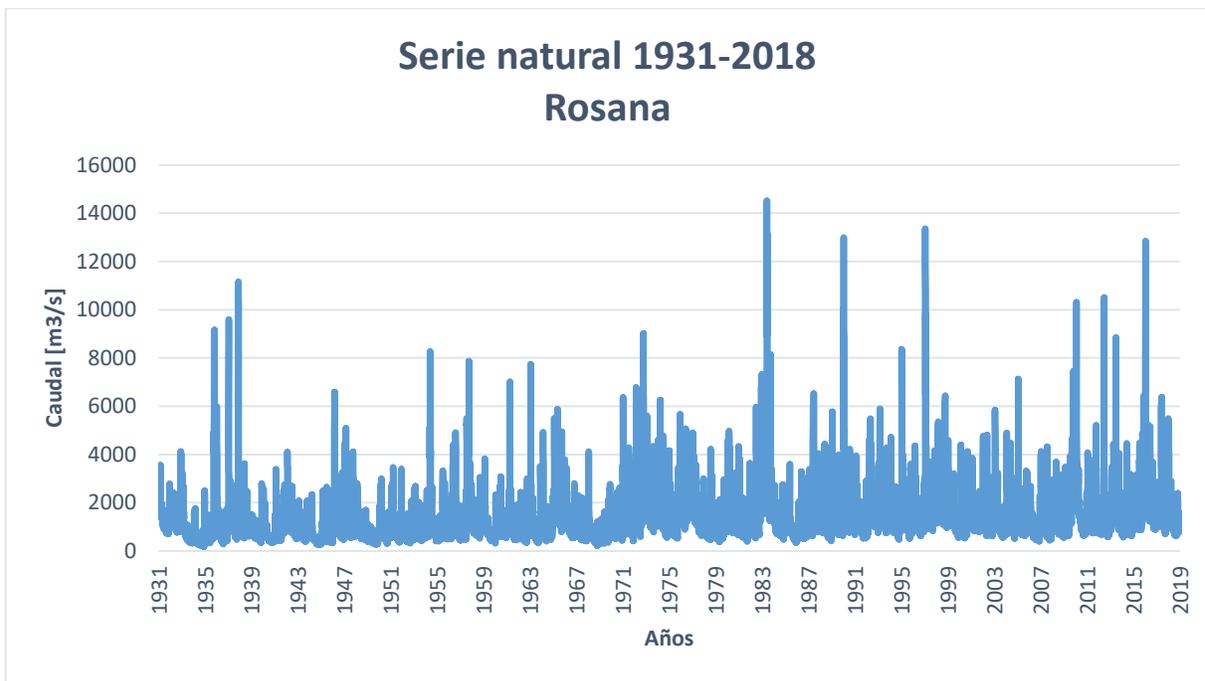


Figura 5.2. Serie de caudales naturales para Rosana, entre los años 1931-2018.

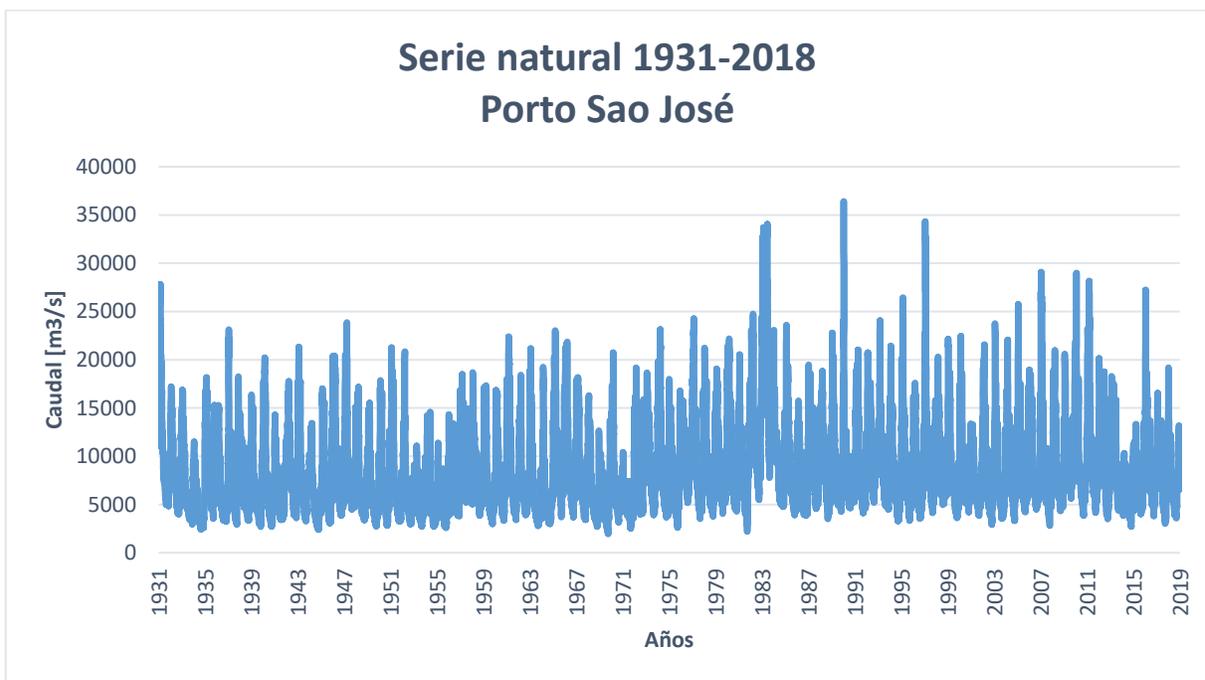


Figura 5.3. Serie de caudales naturales Porto Sao José, entre los años 1931-2018.

### 5.1.2 Validación Serie natural ONS y Porto Sao José ONS

En la *Figura 5.4* la serie natural ONS se compara a través de una correlación lineal y regresión con otra calculada con el modelo MGB, entre los años 1980-2010. La serie de este modelo es más corta que la del ONS, por eso se utiliza esta última para los cálculos

de las siguientes secciones. Se observan coeficientes de correlación con valores de 0,93, 0,87 y 0,75 para Porto Sao José, Porto Primavera y Rosana, respectivamente.

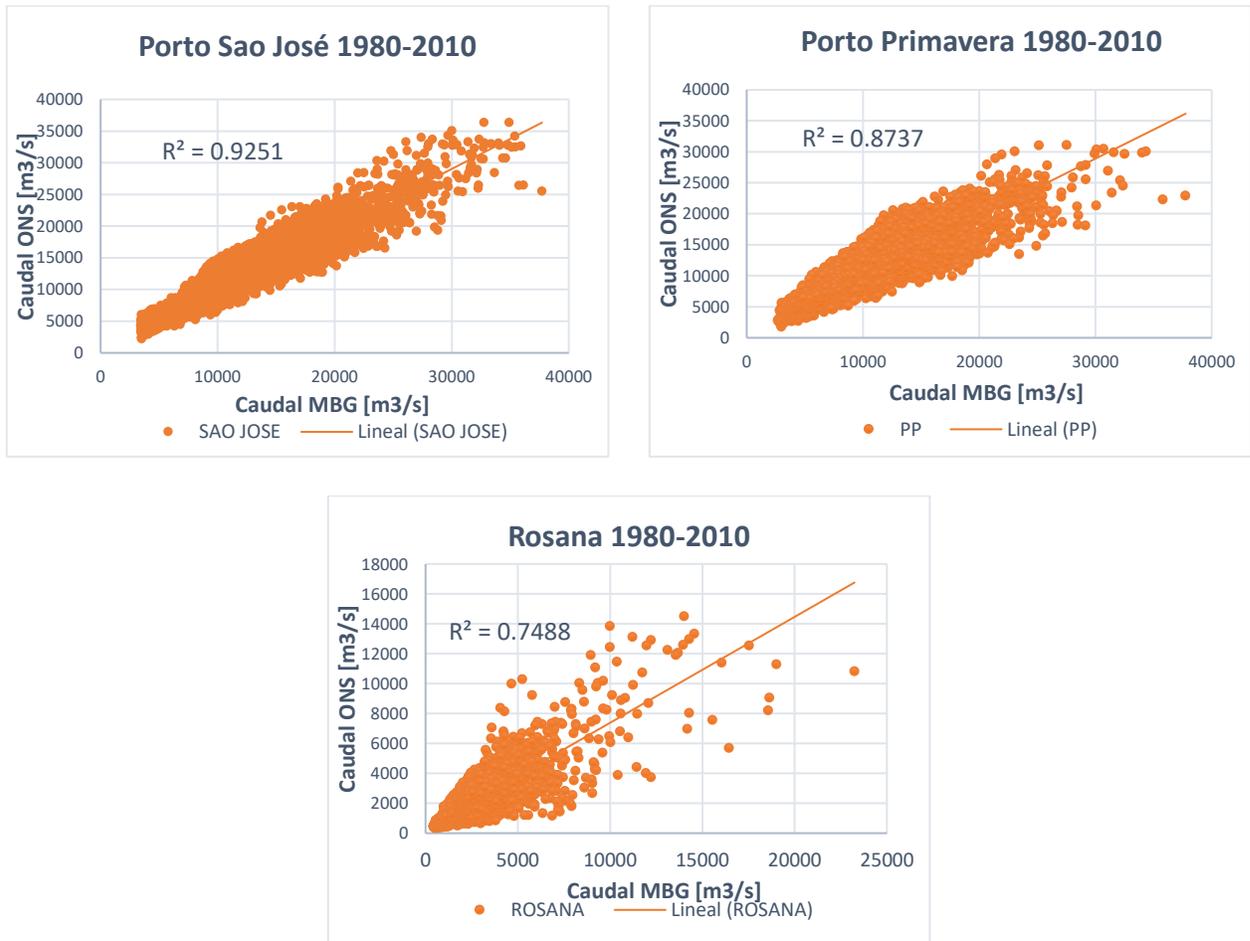


Figura 5.4. Correlación lineal y regresión entre series ONS y series MBG. Para Porto Sao José, Porto Primavera y Rosana, entre los años 1980 y 2010.

Del ONS se obtuvieron caudales para Porto Primavera y Rosana, para el cálculo de la serie Sao José ONS se realizó la suma de las series Porto Primavera ONS y Rosana ONS, ya que Sao José se encuentra bajo la confluencia de estos puntos (Figura 3.1). El modelo MBG entregó caudales de los tres puntos, por lo tanto, con este se estudia si efectivamente en Sao José el caudal es la suma de los dos ríos que llegan a este lugar.

En la Figura 5.5 se compara a través de una Correlación lineal y regresión la serie Porto Sao José MBG con la suma de las series Porto Primavera MBG y Rosana MBG. Se obtiene un coeficiente de correlación de 0,99. Es decir, efectivamente el caudal en Porto Sao José se puede calcular como la suma de los caudales en Porto Primavera y Rosana.

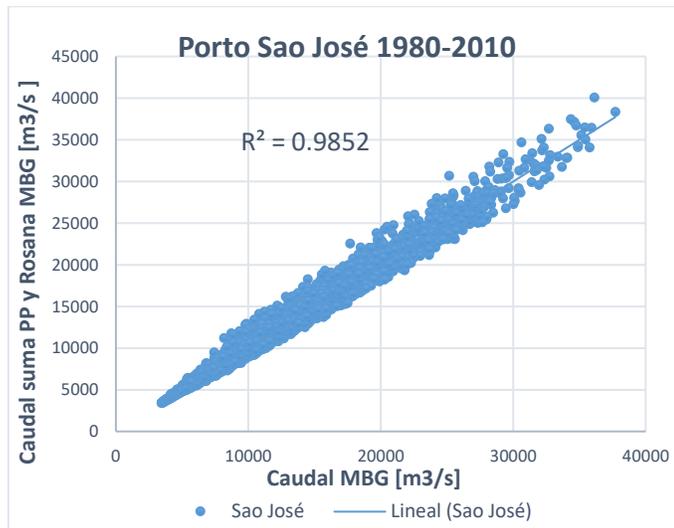


Figura 5.5. Correlación lineal y regresión entre la serie Porto Sao José MBG y la suma de las series Porto Primavera MBG y Rosana MBG, entre los años 1980 y 2010.

### 5.1.3 Series de caudales alterados medidos por estaciones de la ANA.

En las Figuras 5.6, 5.7 y 5.8 se presentan las series de caudales alterados para Porto Primavera, Rosana y Porto Sao José durante los años 1998-2018, 1993-2018 y 1964-2014, respectivamente. Se observan sus máximos, mínimos y variabilidad a través del tiempo. Al igual que en las series naturales el menor caudal medio, máximos y mínimos pertenecen a Rosana y el mayor a Porto Sao José. Las tres series difieren en la variabilidad comparada con las naturales.

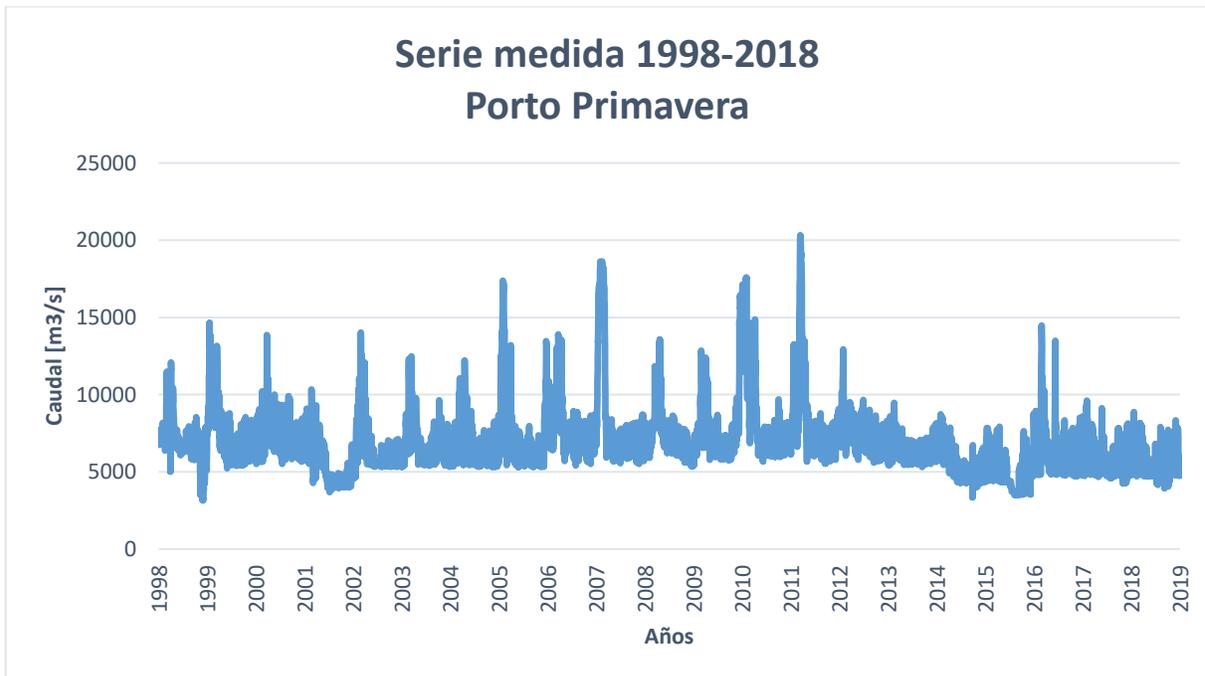


Figura 5.6. Serie de caudales alterados para Porto Primavera, entre los años 1998-2018.

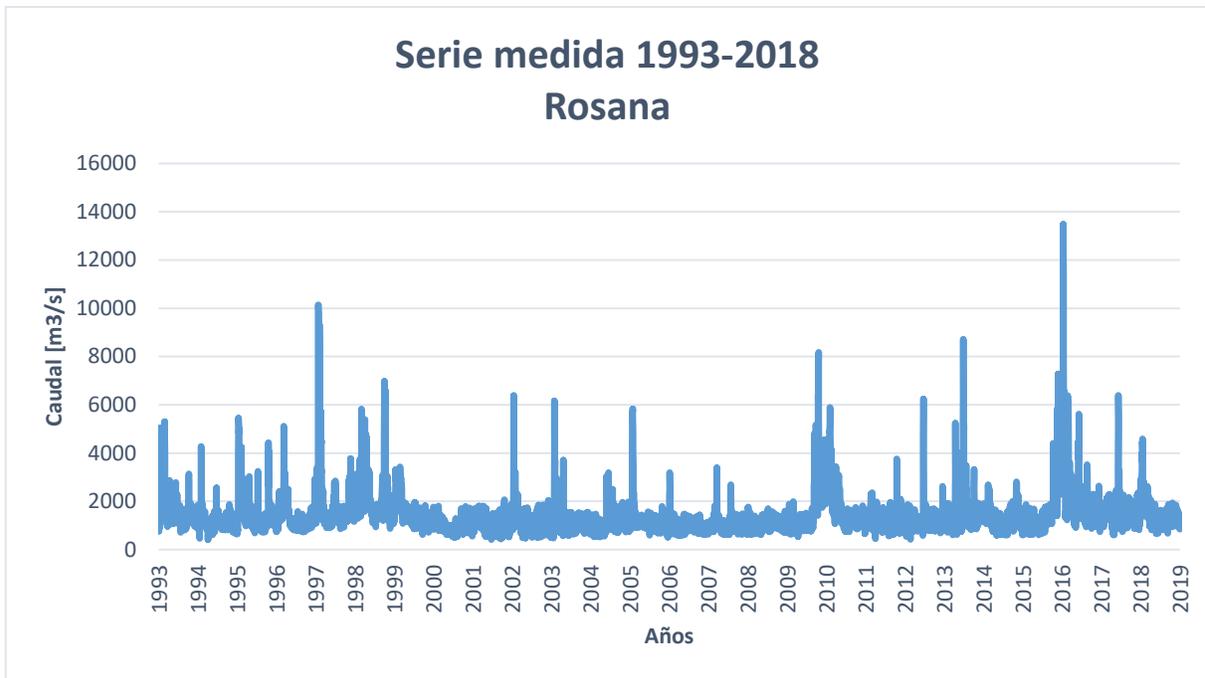


Figura 5.7. Serie de caudales alterados para Rosana entre los años 1993-2018.

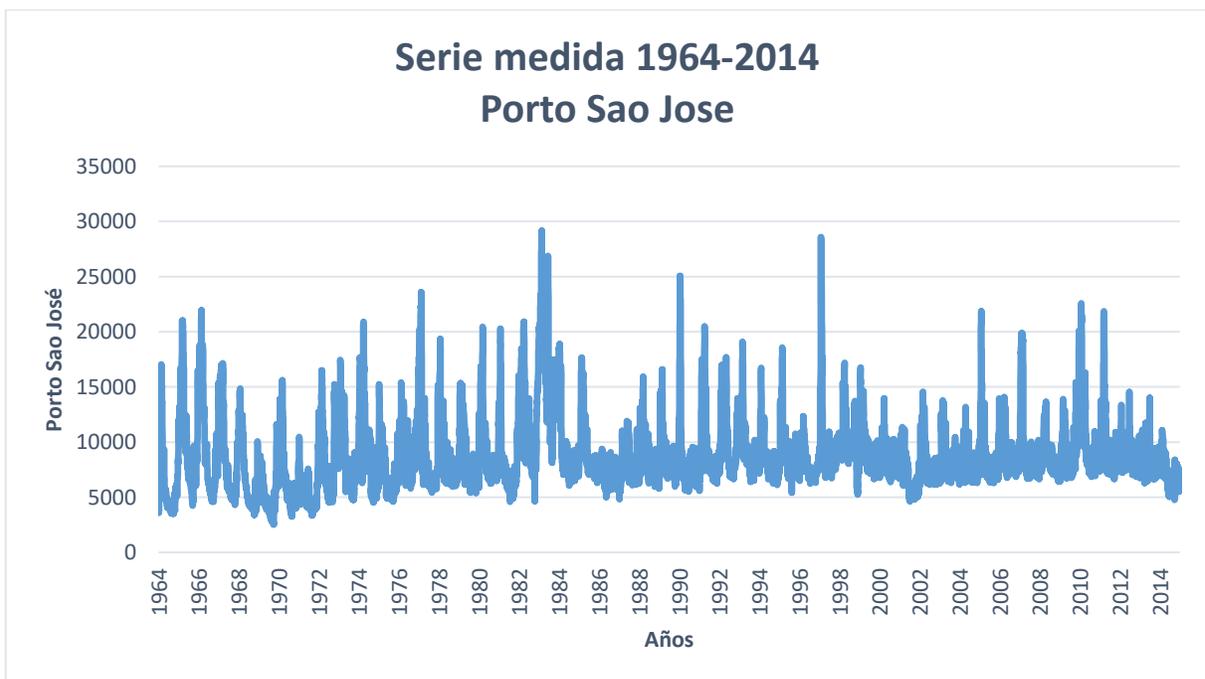


Figura 5.8. Serie de caudales alterados para Porto Sao José entre los años 1964-2014.

#### 5.1.4 Comparación entre las series naturales ONS con las alteradas medidas por ANA.

En las Figuras 5.9, 5.10 y 5.11 se comparan, con una inspección visual preliminar, las series naturales y alteradas de las secciones 5.1.1 y 5.1.3 según lugar y se observan

diferencias. En general las series medidas tienen máximos menores y mínimos mayores. Se puede observar que el régimen alterado se encuentra moderado en su variabilidad, de diferente manera según lugar.

Porto Sao José se encuentra bajo la confluencia de los ríos que pasan por Porto Primavera (Paraná) y Rosana (Paranapanema), siendo el Paraná el que trae mayor caudal en su cauce. En este lugar se mantiene la variabilidad natural de Porto Primavera y, por lo tanto, el caudal alterado presenta una moderación similar.

Rosana presenta una variabilidad natural diferente y, por lo tanto, la moderación generada por los embalses, también lo es.

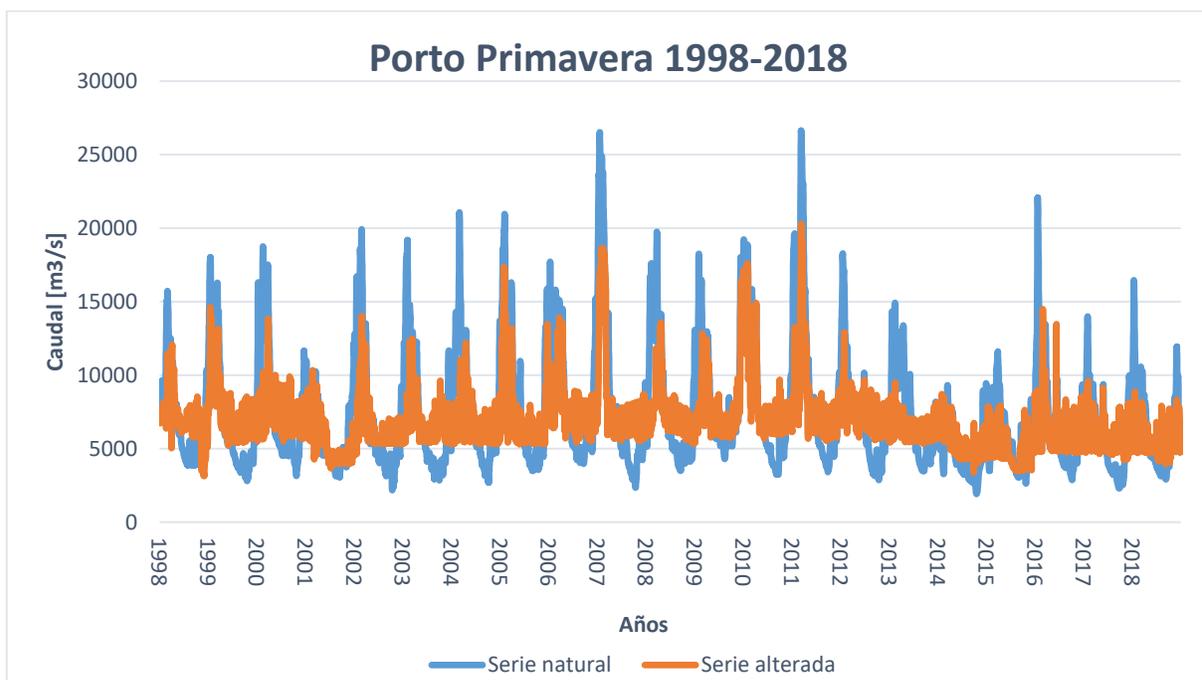


Figura 5.9. Serie de caudales alterados y naturales para Porto Primavera entre los años 1998-2018.

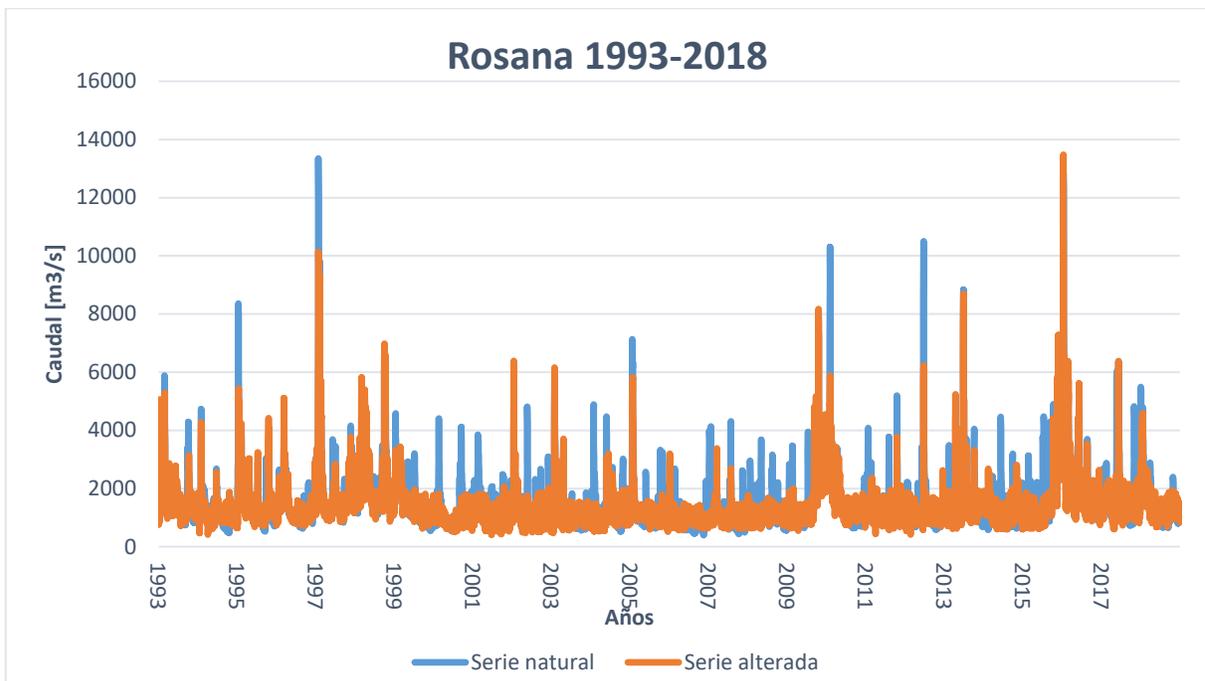


Figura 5.10. Serie de caudales alterados y naturales para Rosana entre los años 1993-2018.

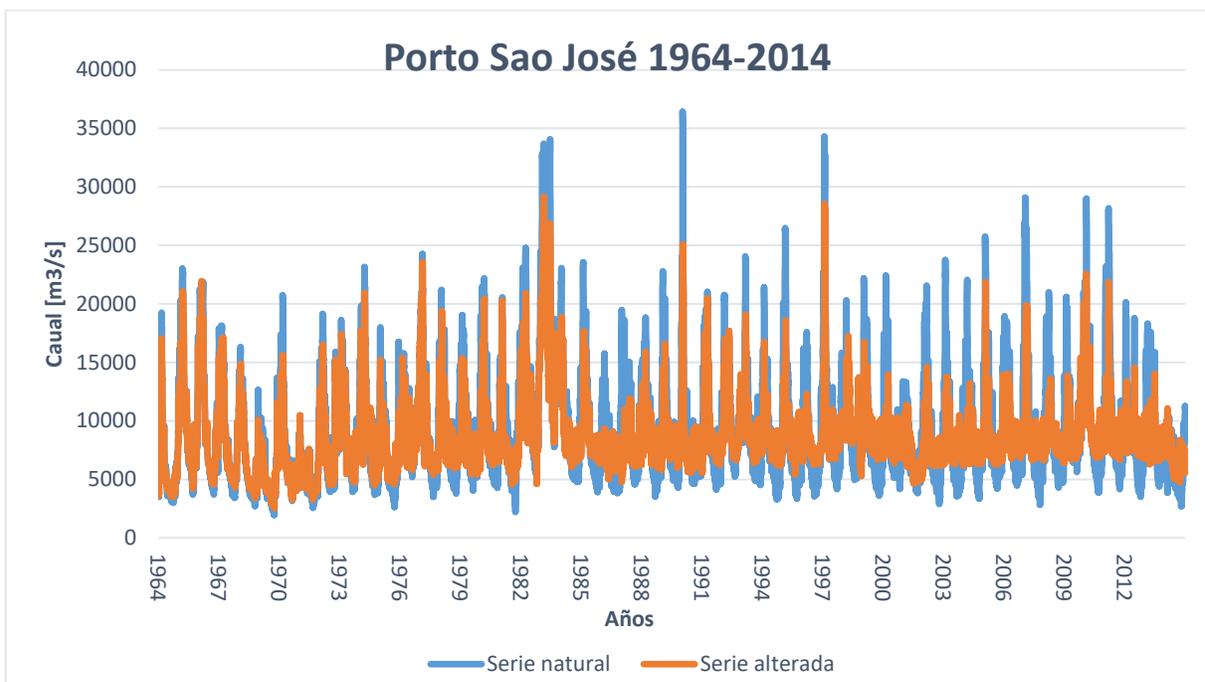


Figura 5.11. Serie de caudales alterados y naturales para Porto Sao José entre los años 1964-2014.

## 5.2 Caracterización régimen hidrológico

A continuación, se caracteriza el régimen natural y alterado que presenta cada lugar. De manera de poder comprender mejor los índices hidrológicos que se calculan en las siguientes secciones y sus implicancias.

### 5.2.1 Régimen Natural

A partir de las series de caudales naturales de la sección 5.1.1, para cada punto de interés se generan curvas de variación estacional y de duración.

En las Figuras 5.12, 5.13 y 5.14 se presentan las curvas de variación estacional, se puede observar que Porto Sao José y Porto Primavera tienen una época húmeda que comienza en noviembre y finaliza en mayo, teniendo su peak entre enero-febrero-marzo.

Por otro lado, Rosana presenta una época húmeda bimodal, es decir, presenta dos peaks diferentes, uno entre enero-febrero y otro entre mayo-julio.

En los tres lugares, a medida que aumenta la probabilidad de excedencia la curva se aplana.

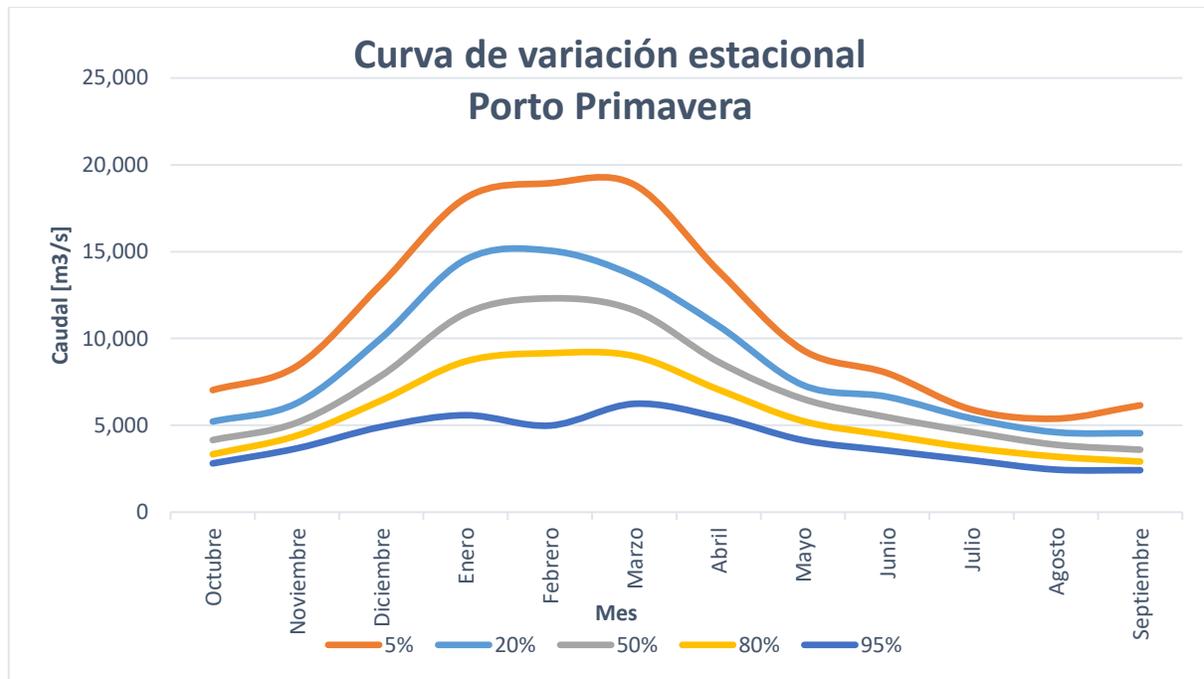


Figura 5.12. Curva de variación estacional natural en Porto Primavera entre los años 1931-2018, para las probabilidades de excedencia de un 5%, 20%, 50%, 80% y 95%.

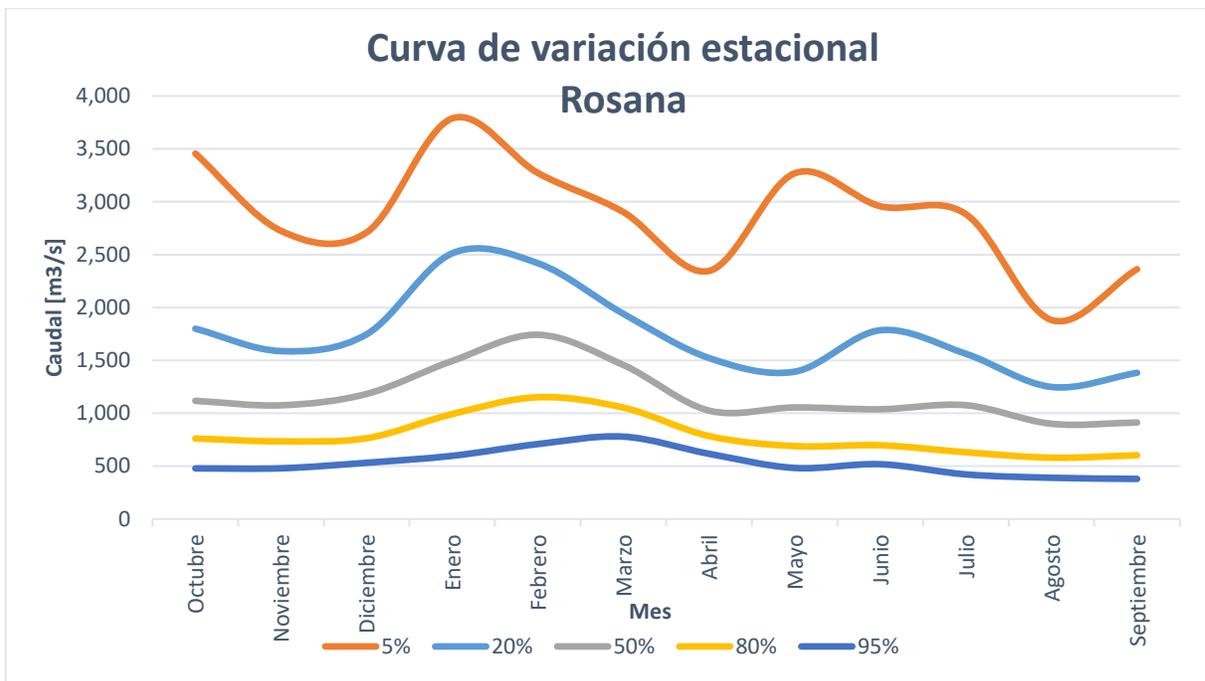


Figura 5.13. Curva de variación estacional natural en Rosana entre los años 1931-2018, para las probabilidades de excedencia de un 5%, 20%, 50%, 80% y 95%.

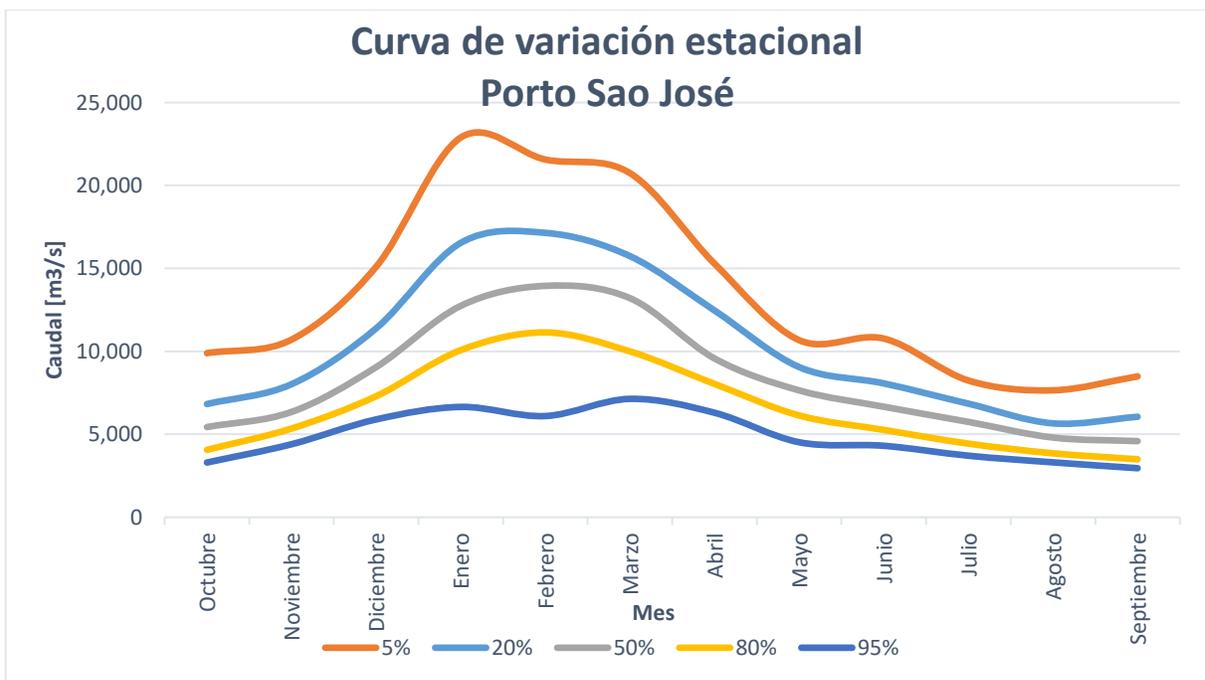


Figura 5.14. Curva de variación estacional natural en Porto Sao José entre los años 1931-2018, para las probabilidades de excedencia de un 5%, 20%, 50%, 80% y 95%.

Con respecto a las curvas de duración, mostradas en las Figuras 5.15, 5.16 y 5.17, se puede observar que, para Porto Sao José y Porto Primavera, a medida que disminuye el porcentaje de excedencia, aumenta el caudal, las curvas de duración según mes se van alejando más entre sí, es decir, aumenta la variación interanual en los caudales mayores.

En el 50% de excedencia, se puede apreciar que diciembre, enero, febrero, marzo, abril y mayo se encuentran sobre la curva anual y junio, julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre, se encuentran bajo.

Para Rosana, también aumenta la variación interanual en los caudales mayores, pero en menor medida que para Porto Primavera y Porto Sao José. En el 50% de excedencia, las curvas ya están bastante cercanas entre sí, y solo se aprecia que diciembre, enero, febrero y marzo están sobre la curva anual.

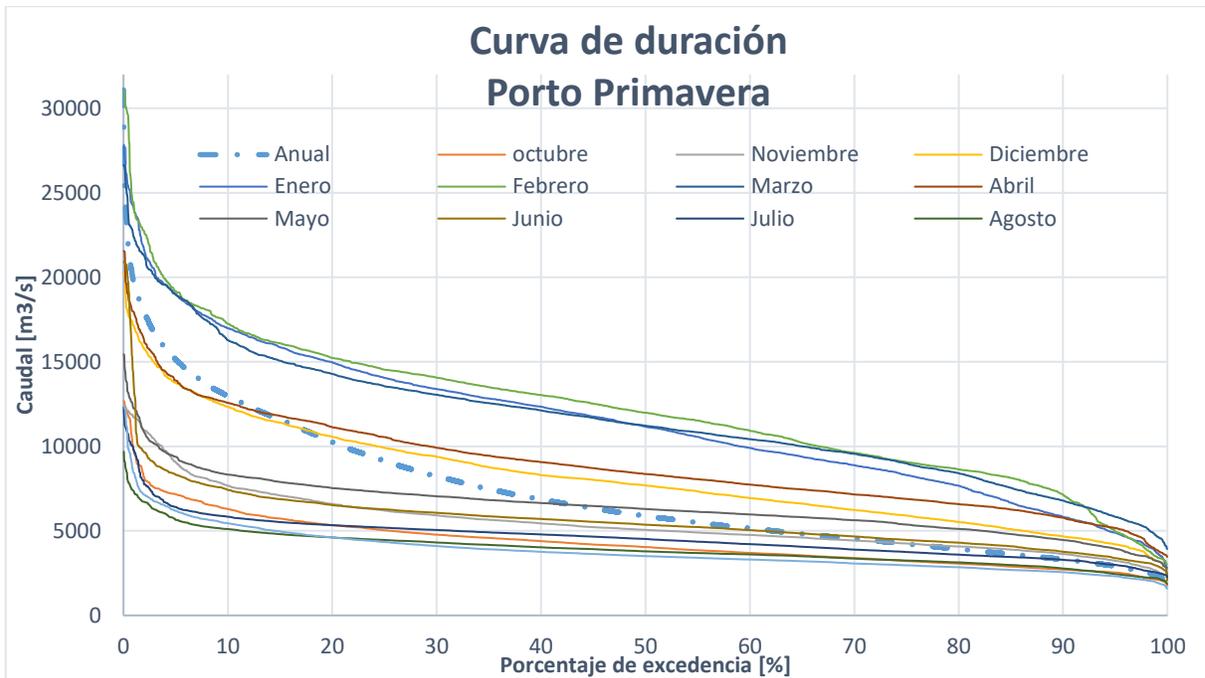


Figura 5.15. Curva natural de duración para cada mes y anual, en Porto Primavera y entre los años 1931-2018.

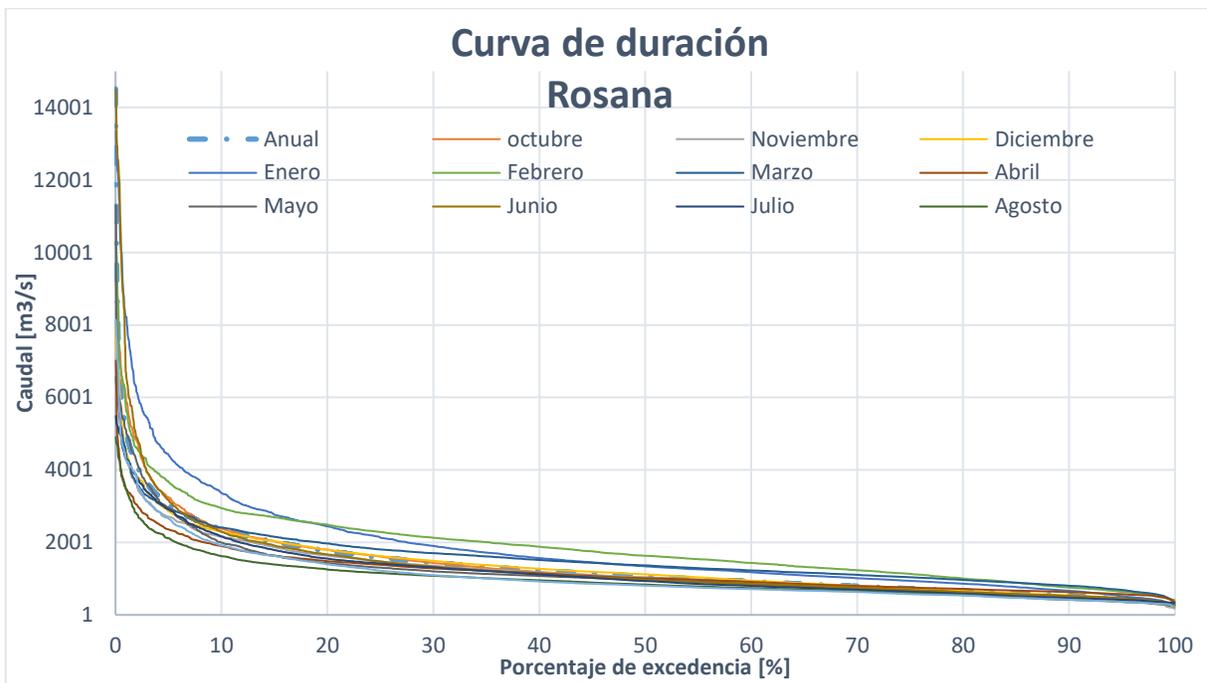


Figura 5.16. Curva natural de duración para cada mes y anual, en Rosana y entre los años 1931-2018.

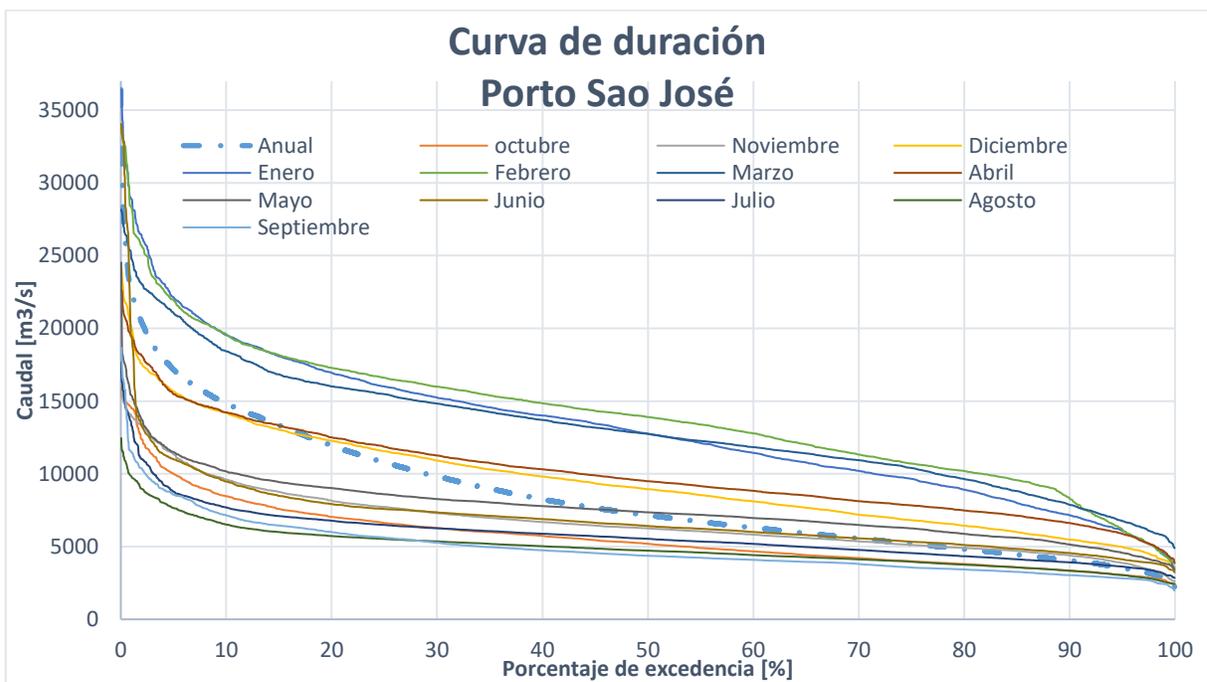


Figura 5.17. Curva natural de duración para cada mes y anual, en Porto Sao José y entre los años 1931-2018.

### 5.2.2 Régimen Alterado

A partir de las series de caudales alterados de la sección 5.1.3, para cada lugar se generan curvas de variación estacional y de duración.

En las Figuras 5.18, 5.19 y 5.20 se presentan las curvas de variación estacional, se puede observar que para Porto Sao José y Porto Primavera se reduce su época húmeda comparada con el régimen natural (ver *Figura 5.12* y *Figura 5.14*) y se mantienen sus peaks entre enero, febrero y marzo, aunque con menor magnitud.

Por otro lado, Rosana también reduce su época húmeda natural (Ver *Figura 5.13*), y presenta varios peaks, siendo el mayor en octubre.

En los tres lugares, a medida que aumenta la probabilidad de excedencia la curva se aplanan.

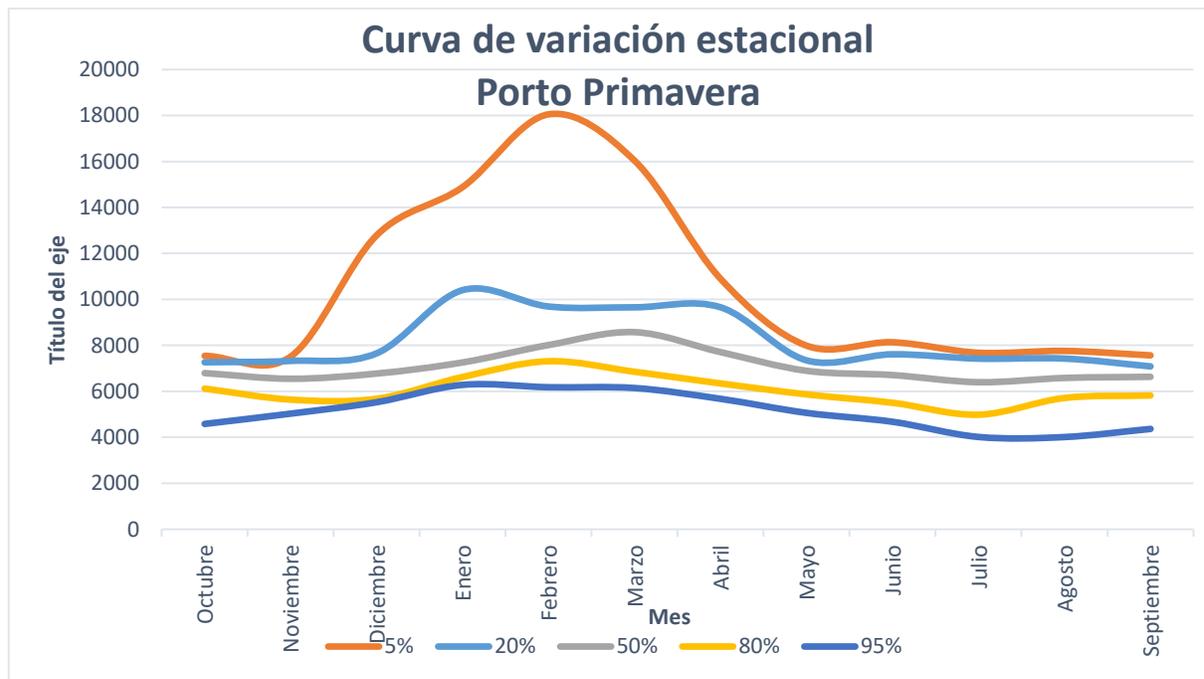


Figura 5.18. Curva de variación estacional alterada en Porto Primavera entre los años 1998-2018, para las probabilidades de excedencia de un 5%, 20%, 50%, 80% y 95%.

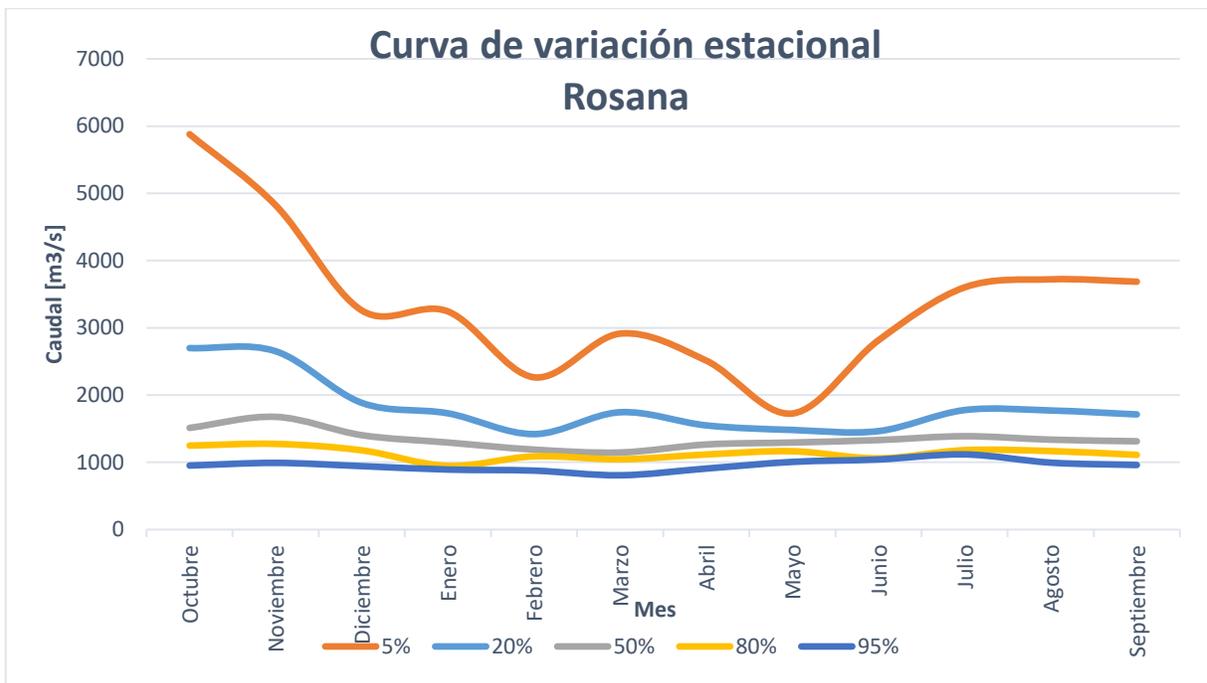


Figura 5.19. Curva de variación estacional alterada en Rosana entre los años 1993-2018, para las probabilidades de excedencia de un 5%, 20%, 50%, 80% y 95%.

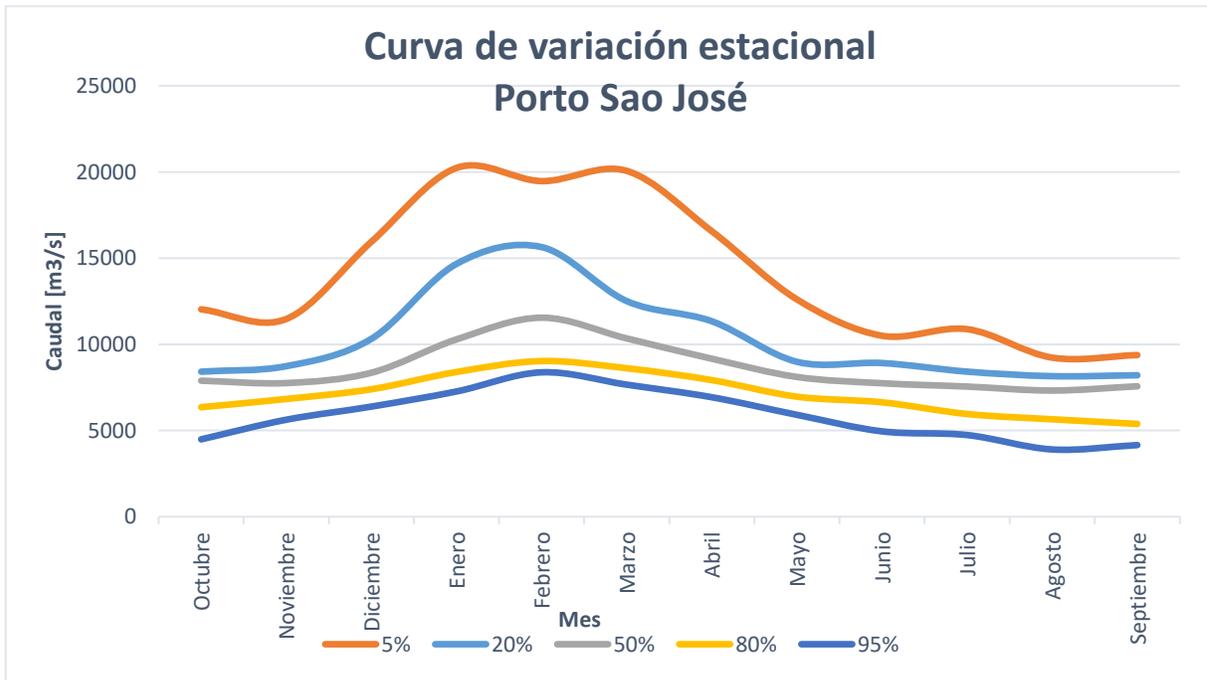
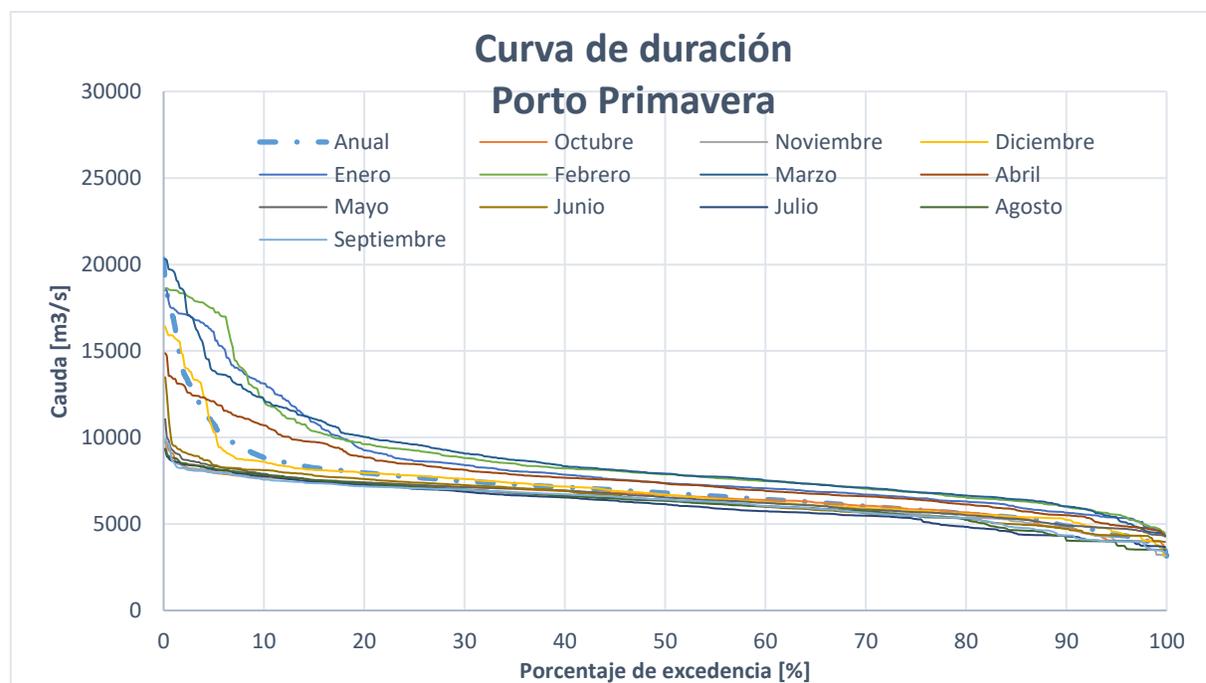


Figura 5.20. Curva de variación estacional alterada en Porto Sao José entre los años 1964-2014, para las probabilidades de excedencia de un 5%, 20%, 50%, 80% y 95%.

Con respecto a las curvas de duración, mostradas en las Figuras 5.21, 5.22 y 5.23 se puede observar que, para Porto Sao José y Porto Primavera, la variación interanual de los caudales es menor que para el régimen natural (ver Figura 5.15 y 5.17), aunque sigue

aumentado al tener caudales mayores. En el 50% de excedencia, se puede apreciar que enero, febrero, marzo y abril se encuentran sobre la curva anual para Porto Primavera y se incluye diciembre en Porto Sao José.

Para Rosana, también aumenta la variación interanual en los caudales mayores, pero en menor medida que para Porto Primavera y Porto Sao José. Comparado con el régimen natural la variación interanual es menor (ver *Figura 5.16*), teniendo desde el 30% las curvas muy parecidas. En el 50% de excedencia, las curvas están bastante cercanas entre sí y no se distingue una diferencia significativa entre ellas.



*Figura 5.21.* Curva alterada de duración para cada mes y anual, en Porto Primavera y entre los años 1998-2018.

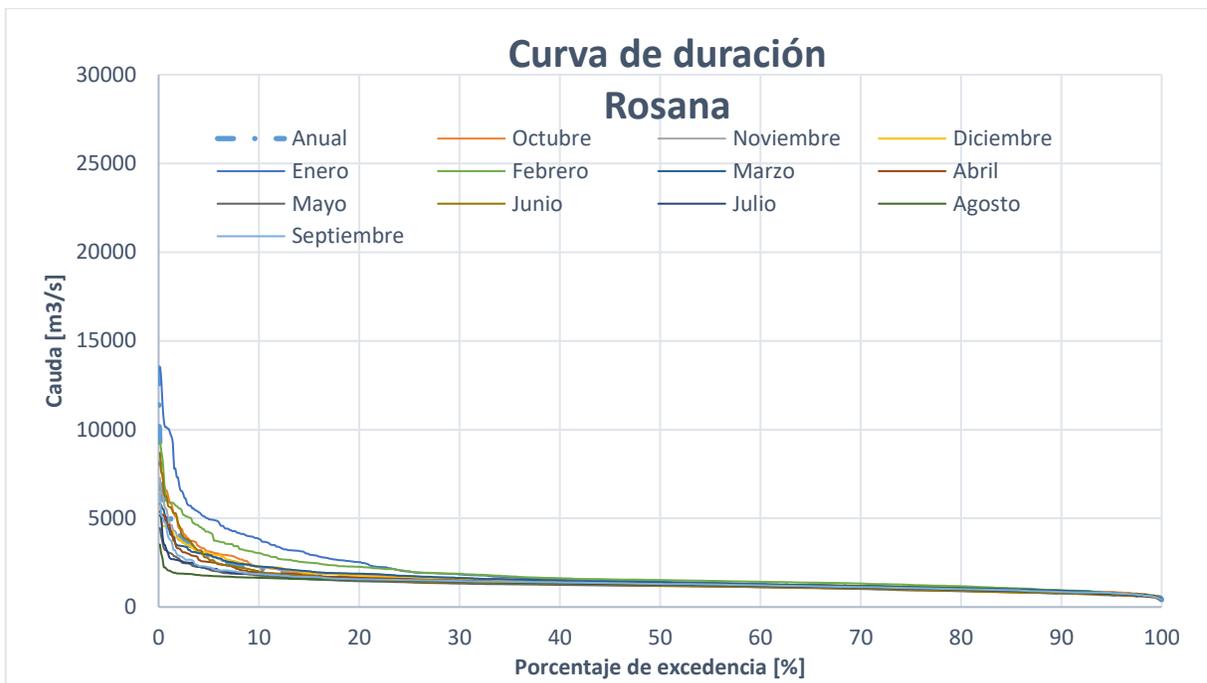


Figura 5.22. Curva alterada de duración para cada mes y anual, en Rosana y entre los años 1993-2018.

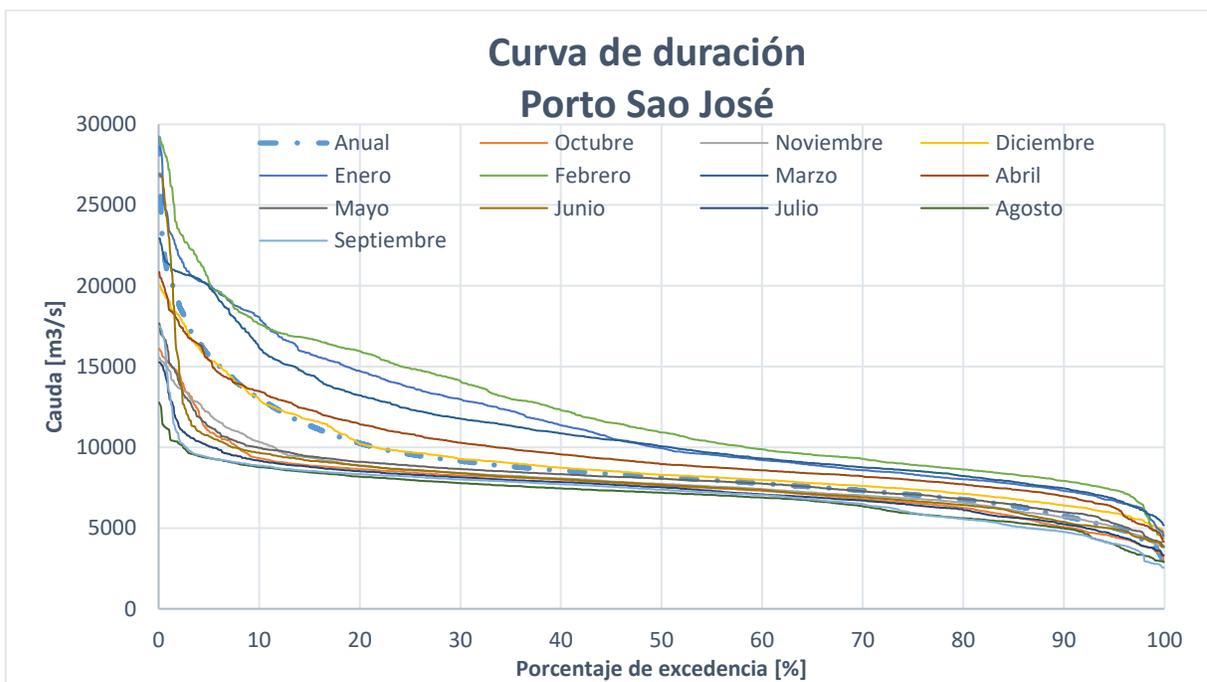


Figura 5.23. Curva alterada de duración para cada mes y anual, en Porto Sao José y entre los años 1964-2014.

### 5.3 Alteración hidrológica

A continuación, se presenta el cálculo de indicadores de alteración hidrológica, con respecto al régimen natural, para cada lugar estudiado, a través de los 33 índices IHA y

el método RVA, que cuantifica el grado de alteración de los índices, mediante los factores HA.

### 5.3.1 Porto Sao José

En esta sección se muestran los resultados de la alteración producida por todos los embalses construidos aguas arriba de Porto Sao José, este incluye los ubicados en el río Paraná y todos sus afluentes, como el río Paranapanema. Se estudian series de caudales entre los años 1964-1986.

Se presenta en la Tabla 5.1 el valor de la mediana para los 33 índices IHA y en la Tabla 5.2 el valor de la alteración hidrológica, HA, para cada uno de estos. En la Tabla 4.1, se encuentra el detalle de cada grupo de parámetros.

Tabla 5.1. Tabla resumen con el valor de los índices IHA y límites para generar las tres categorías RVA, en Porto Sao José y para los años 1964-1986.

|                              | PERIODO NATURAL: 1964-1986 |                     | PERIODO ALTERADO: 1964-1986 |                     | LÍMITES DEL RVA |       |
|------------------------------|----------------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------|-----------------|-------|
|                              | Medianas                   | Coef. de Dispersión | Medianas                    | Coef. de Dispersión | Bajo            | Alto  |
| <b>PARÁMETROS GRUPO 1</b>    |                            |                     |                             |                     |                 |       |
| OCTUBRE [m3/s]               | 5912                       | 0,4                 | 6623                        | 0,4                 | 4999            | 6804  |
| NOVIEMBRE [m3/s]             | 7400                       | 0,4                 | 7104                        | 0,4                 | 6164            | 8476  |
| DICIEMBRE [m3/s]             | 9910                       | 0,6                 | 8489                        | 0,4                 | 8522            | 12160 |
| ENERO [m3/s]                 | 14210                      | 0,3                 | 12370                       | 0,5                 | 12870           | 16050 |
| FEBRERO [m3/s]               | 13750                      | 0,5                 | 12710                       | 0,6                 | 11460           | 17090 |
| MARZO [m3/s]                 | 12700                      | 0,4                 | 11380                       | 0,5                 | 11260           | 14490 |
| ABRIL [m3/s]                 | 10150                      | 0,4                 | 8789                        | 0,4                 | 8800            | 12160 |
| MAYO [m3/s]                  | 7961                       | 0,4                 | 7270                        | 0,4                 | 6978            | 8978  |
| JUNIO [m3/s]                 | 6782                       | 0,4                 | 6936                        | 0,4                 | 6316            | 7487  |
| JULIO [m3/s]                 | 5918                       | 0,3                 | 6679                        | 0,3                 | 5352            | 6194  |
| AGOSTO [m3/s]                | 5256                       | 0,3                 | 5975                        | 0,4                 | 4659            | 5620  |
| SEPTIEMBRE [m3/s]            | 4879                       | 0,5                 | 5924                        | 0,5                 | 4352            | 5836  |
| <b>PARÁMETROS GRUPO 2</b>    |                            |                     |                             |                     |                 |       |
| 1-DÍA MÍNIMO [m3/s]          | 3644                       | 0,3                 | 4691                        | 0,3                 | 3244            | 3839  |
| 3-DÍAS MÍNIMO [m3/s]         | 3820                       | 0,3                 | 4896                        | 0,4                 | 3550            | 3974  |
| 7-DÍAS MÍNIMO [m3/s]         | 4104                       | 0,3                 | 5280                        | 0,4                 | 3651            | 4301  |
| 30-DÍAS MÍNIMO [m3/s]        | 4728                       | 0,3                 | 5728                        | 0,4                 | 4108            | 5106  |
| 90-DÍAS MÍNIMO [m3/s]        | 5503                       | 0,3                 | 6221                        | 0,3                 | 4923            | 5869  |
| 1-DÍA MÁXIMO [m3/s]          | 20630                      | 0,3                 | 17540                       | 0,3                 | 18420           | 22520 |
| 3-DÍAS MÁXIMO [m3/s]         | 20490                      | 0,3                 | 17380                       | 0,3                 | 18050           | 22380 |
| 7-DÍAS MÁXIMO [m3/s]         | 20150                      | 0,3                 | 17180                       | 0,3                 | 17440           | 21980 |
| 30-DÍAS MÁXIMO [m3/s]        | 17100                      | 0,3                 | 15090                       | 0,3                 | 15540           | 18630 |
| 90-DÍAS MÁXIMO [m3/s]        | 14430                      | 0,3                 | 12360                       | 0,3                 | 12990           | 16270 |
| CAUDAL CERO [días]           | 0,0                        | 0,0                 | 0,0                         | 0,0                 | 0,0             | 0,0   |
| INDICE CAUDAL BASE [-]       | 0,4                        | 0,2                 | 0,6                         | 0,3                 | 0,4             | 0,5   |
| <b>PARÁMETROS GRUPO 3</b>    |                            |                     |                             |                     |                 |       |
| FECHA DE CAUDAL MÍN          | 267,5                      | 0,1                 | 269,0                       | 0,1                 | 256,3           | 275,0 |
| FECHA DE CAUDAL MÁX          | 36,5                       | 0,1                 | 44,5                        | 0,1                 | 30,4            | 63,2  |
| <b>PARÁMETROS GRUPO 4</b>    |                            |                     |                             |                     |                 |       |
| CONTEO PULSOS BAJOS          | 6,0                        | 1,0                 | 2,5                         | 2,5                 | 4,0             | 9,0   |
| DURACIÓN PULSOS BAJOS [días] | 5,5                        | 1,6                 | 4,0                         | 2,6                 | 3,1             | 7,1   |
| CONTEO PULSOS ALTOS          | 4,0                        | 0,6                 | 2,5                         | 0,9                 | 3,0             | 4,4   |

|                                     |        |      |        |      |        |        |
|-------------------------------------|--------|------|--------|------|--------|--------|
| <b>DURACIÓN PULSOS ALTOS [días]</b> | 8,0    | 1,0  | 12,0   | 1,9  | 7,1    | 12,5   |
| <b>PARÁMETROS GRUPO 5</b>           |        |      |        |      |        |        |
| TASA DE SUBIDA [-]                  | 290,0  | 0,6  | 250,0  | 0,4  | 219,6  | 353,7  |
| TASA DE BAJADA [-]                  | -300,5 | -0,8 | -270,8 | -0,6 | -369,9 | -243,5 |
| NÚMERO DE REVERSAS                  | 143,0  | 0,3  | 96,0   | 0,2  | 119,5  | 153,4  |

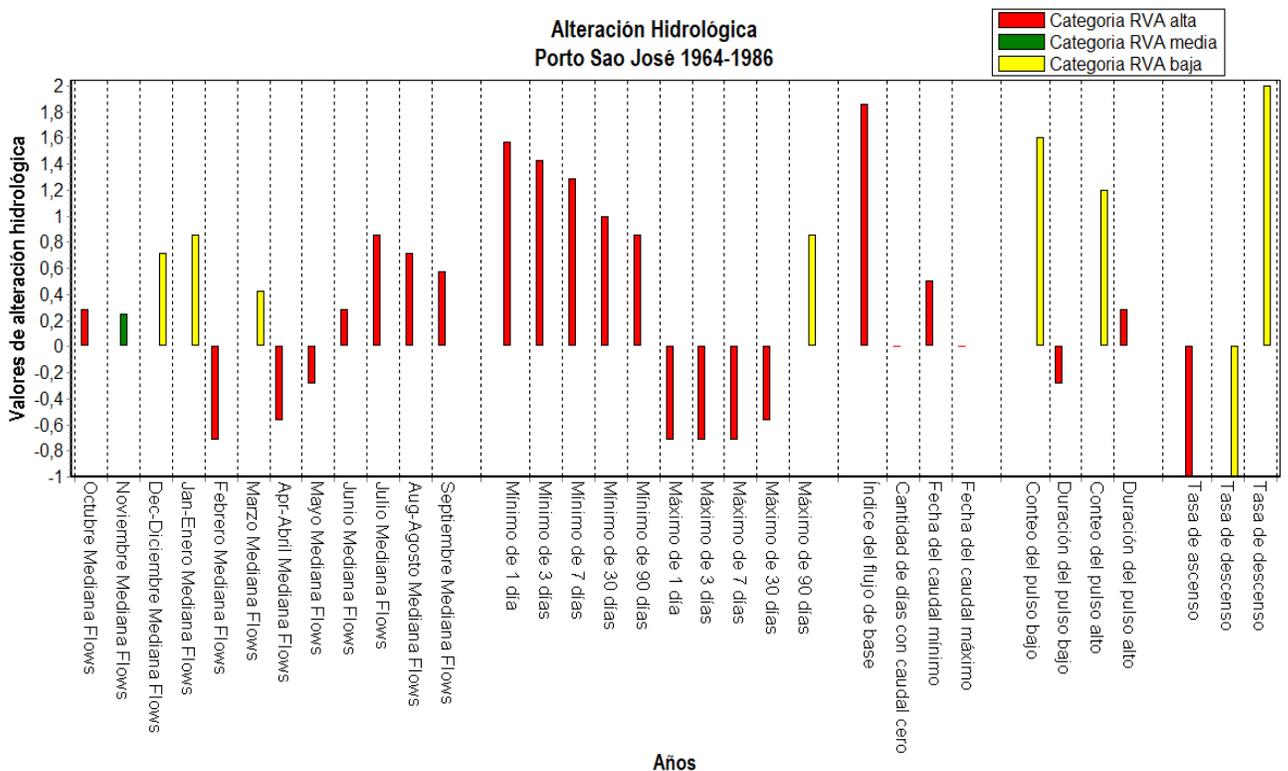
Tabla 5.2. Valor de la alteración hidrológica, HA, para cada índice y categoría RVA, en Porto Sao José y para los años 1964-1986.

|                           | <b>CATEGORÍA MEDIA DE RVA</b> | <b>CATEGORÍA ALTO DE RVA</b> | <b>CATEGORÍA BAJO DE RVA</b> |
|---------------------------|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|
|                           | Alteración [-]                | Alteración [-]               | Alteración [-]               |
| <b>PARÁMETROS GRUPO 1</b> |                               |                              |                              |
| OCTUBRE                   | 0,00                          | 0,29                         | -0,29                        |
| NOVIEMBRE                 | 0,25                          | -0,14                        | -0,14                        |
| DICIEMBRE                 | -0,38                         | -0,29                        | 0,71                         |
| ENERO                     | -0,25                         | -0,57                        | 0,86                         |
| FEBRERO                   | 0,25                          | -0,71                        | 0,43                         |
| MARZO                     | -0,13                         | -0,29                        | 0,43                         |
| ABRIL                     | 0,00                          | -0,57                        | 0,57                         |
| MAYO                      | 0,13                          | -0,29                        | 0,14                         |
| JUNIO                     | -0,13                         | 0,29                         | -0,14                        |
| JULIO                     | -0,38                         | 0,86                         | -0,43                        |
| AGOSTO                    | -0,25                         | 0,71                         | -0,43                        |
| SEPTIEMBRE                | -0,13                         | 0,57                         | -0,43                        |
| <b>PARÁMETROS GRUPO 2</b> |                               |                              |                              |
| 1-DÍA MÍNIMO              | -0,75                         | 1,57                         | -0,71                        |
| 3-DÍAS MÍNIMO             | -0,75                         | 1,43                         | -0,57                        |
| 7-DÍAS MÍNIMO             | -0,63                         | 1,29                         | -0,57                        |
| 30-DÍAS MÍNIMO            | -0,38                         | 1,00                         | -0,57                        |
| 90-DÍAS MÍNIMO            | -0,38                         | 0,86                         | -0,43                        |
| 1-DÍA MÁXIMO              | 0,00                          | -0,71                        | 0,71                         |
| 3-DÍAS MÁXIMO             | 0,00                          | -0,71                        | 0,71                         |
| 7-DÍAS MÁXIMO             | 0,13                          | -0,71                        | 0,57                         |
| 30-DÍAS MÁXIMO            | 0,00                          | -0,57                        | 0,57                         |
| 90-DÍAS MÁXIMO            | -0,25                         | -0,57                        | 0,86                         |
| NÚM DÍAS CAUDAL CERO      | 0,00                          | 0,00                         | 0,00                         |
| INDICE CAUDAL BASE        | -0,88                         | 1,86                         | -0,86                        |
| <b>PARÁMETROS GRUPO 3</b> |                               |                              |                              |
| FECHA DE CAUDAL MÍN       | -0,18                         | 0,50                         | 0,00                         |
| FECHA DE CAUDAL MÁX       | 0,00                          | 0,00                         | 0,00                         |
| <b>PARÁMETROS GRUPO 4</b> |                               |                              |                              |
| CONTEO PULSOS BAJOS       | -0,36                         | -0,67                        | 1,60                         |
| DURACIÓN PULSOS BAJ       | -0,29                         | -0,29                        | 0,14                         |
| CONTEO PULSOS ALTOS       | -0,30                         | -0,43                        | 1,20                         |
| DURACIÓN PULSOS ALT       | -0,29                         | 0,29                         | -0,29                        |
| <b>PARÁMETROS GRUPO 5</b> |                               |                              |                              |
| TASA DE SUBIDA            | 0,50                          | -1,00                        | 0,43                         |
| TASA DE BAJADA            | 0,75                          | 0,14                         | -1,00                        |
| NÚMERO DE REVERSAS        | -0,88                         | -1,00                        | 2,00                         |
| MÁXIMO                    | 0,88                          | 1,86                         | 2,00                         |
| MÍNIMO                    | 0,00                          | 0,00                         | 0,00                         |
| PROMEDIO ABSOLUTO         | 0,29                          | 0,62                         | 0,55                         |

En la *Figura 5.24* se presenta un gráfico con el mayor valor de alteración hidrológica, según categoría, para cada índice IHA.

Se puede observar que en algunos de los meses húmedos (diciembre, enero y marzo) la mayor alteración es producida porque los caudales promedio aumentan en la categoría baja, es decir, hay más caudales entre los percentiles menores al 33 y menos en las otras dos categorías (ver sección 4.4). En otros meses húmedos (febrero, abril y mayo) la mayor alteración es producida porque los caudales promedio disminuyen en la categoría alta y aumentan en las otras dos restantes. Por lo tanto, en los meses húmedos, el caudal promedio disminuye su magnitud.

Por otro lado, en los meses secos los caudales promedio aumentan en la categoría alta, es decir, el caudal promedio aumenta su magnitud. También aumenta la categoría alta para los mínimos y disminuye para los máximos. Con respecto a los pulsos, los bajos y altos disminuyen su cantidad, sin embargo, los altos aumentan su duración, mientras que los bajos la disminuyen.



*Figura 5.24.* Mayor alteración hidrológica entre las tres categorías para cada índice, en Porto Sao José y para los años 1964-1986.

Se identificaron los índices que muestran una mayor alteración respecto al régimen natural (ver Tabla 5.2). En las Figuras 5.25 y 5.26 se presentan las series del indicador “inversiones” e “índice de caudal base”, respectivamente.

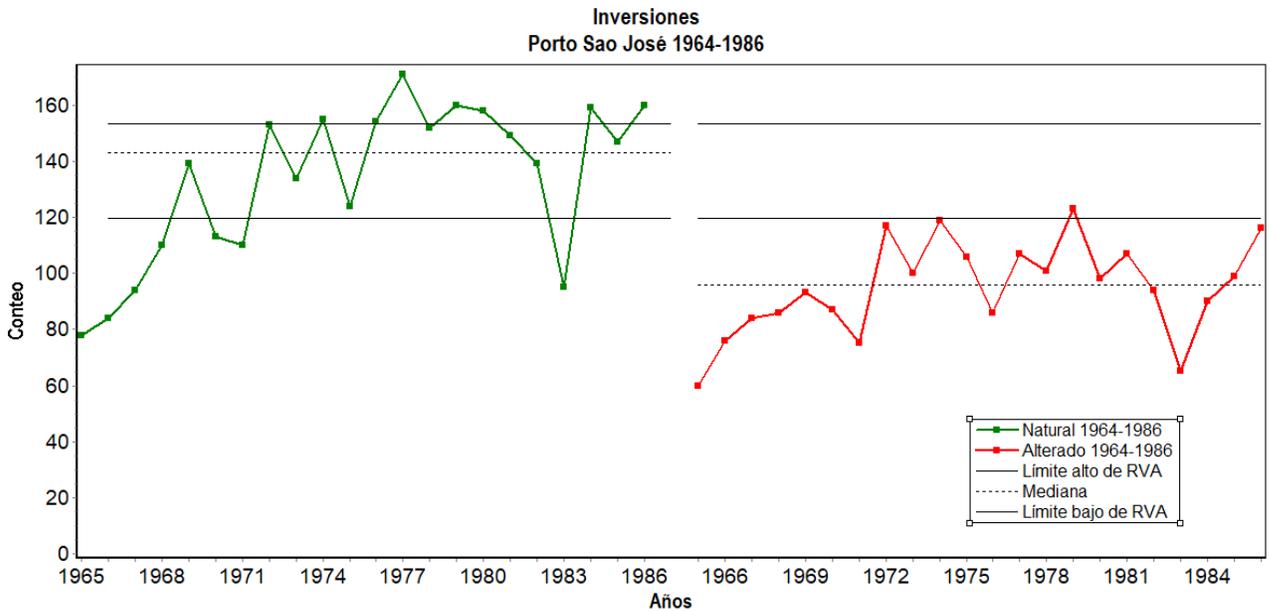


Figura 5.25. Valor del índice IHA inversiones, para el periodo natural y alterado, en Porto Sao José y para los años 1964-1986.

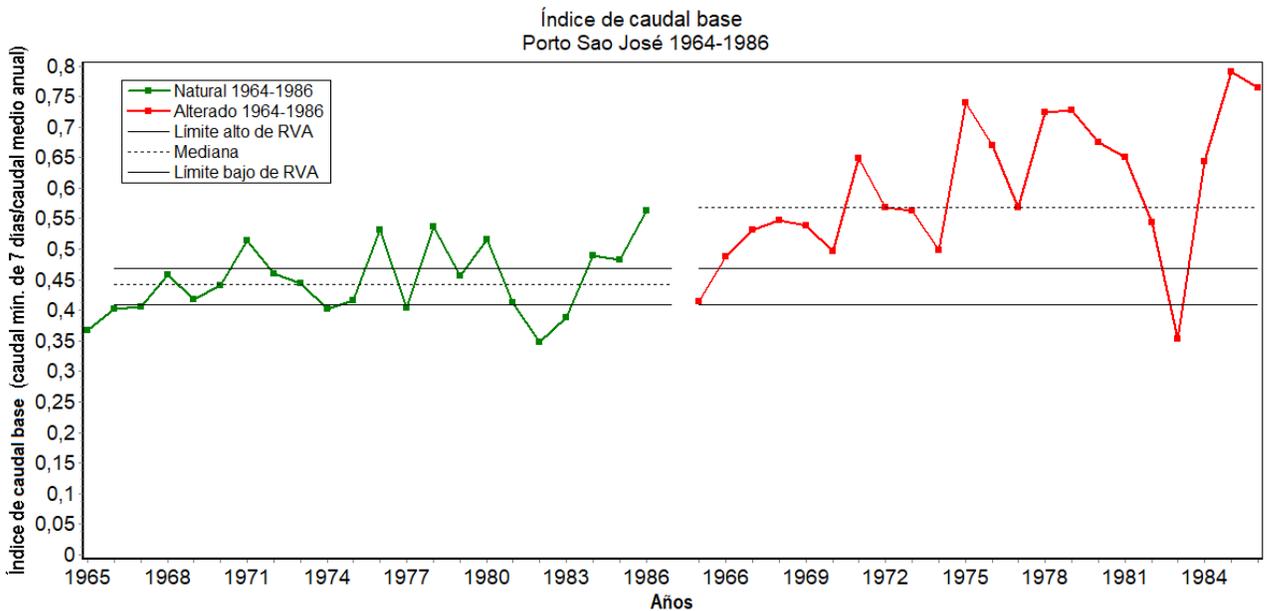


Figura 5.26. Valor del índice IHA caudal base, para el periodo natural y alterado, en Porto Sao José y para los años 1964-1986.

En esta sección se muestran los resultados de la alteración producida por todos los embalses construidos aguas arriba de Porto Sao José, este incluye los ubicados en el río Paraná y todos sus afluentes, como el río Paranapanema. Se estudian series de caudales de los últimos veinte años 1994-2014 (que ya incluye la construcción de los embalses Rosana y Porto Primavera).

Se presenta en la Tabla 5.3 el valor de la mediana para los 33 índices IHA y en la Tabla 5.4 el valor de la alteración hidrológica, HA, para cada uno de estos.

Tabla 5.3. Tabla resumen con el valor de los índices IHA y límites para generar las tres categorías RVA, en Porto Sao José y para los años 1994-2014.

|                              | PERIODO NATURAL: 1994-2014 |                     | PERIODO ALTERADO: 1994-2014 |                     | LÍMITES DE RVA |        |
|------------------------------|----------------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------|----------------|--------|
|                              | Medianas                   | Coef. de Dispersión | Medianas                    | Coef. de Dispersión | Bajo           | Alto   |
| <b>PARÁMETROS GRUPO 1</b>    |                            |                     |                             |                     |                |        |
| OCTUBRE [m3/s]               | 5887                       | 0,4                 | 8094                        | 0,1                 | 5132           | 6230   |
| NOVIEMBRE [m3/s]             | 6403                       | 0,2                 | 7904                        | 0,1                 | 6038           | 6675   |
| DICIEMBRE [m3/s]             | 9160                       | 0,4                 | 8255                        | 0,1                 | 7952           | 10160  |
| ENERO [m3/s]                 | 13170                      | 0,5                 | 9332                        | 0,4                 | 11240          | 16430  |
| FEBRERO [m3/s]               | 14920                      | 0,3                 | 9545                        | 0,3                 | 13350          | 16350  |
| MARZO [m3/s]                 | 13410                      | 0,2                 | 9368                        | 0,2                 | 12330          | 14960  |
| ABRIL [m3/s]                 | 10300                      | 0,4                 | 8931                        | 0,2                 | 9265           | 11840  |
| MAYO [m3/s]                  | 7654                       | 0,2                 | 8198                        | 0,1                 | 7394           | 8059   |
| JUNIO [m3/s]                 | 6787                       | 0,2                 | 8281                        | 0,2                 | 6382           | 7301   |
| JULIO [m3/s]                 | 6004                       | 0,2                 | 8071                        | 0,2                 | 5732           | 6293   |
| AGOSTO [m3/s]                | 4913                       | 0,2                 | 7889                        | 0,2                 | 4675           | 5360   |
| SEPTIEMBRE [m3/s]            | 4779                       | 0,3                 | 8013                        | 0,2                 | 4341           | 5081   |
| <b>PARÁMETROS GRUPO 2</b>    |                            |                     |                             |                     |                |        |
| 1-DÍA MÍNIMO [m3/s]          | 3730                       | 0,2                 | 6299                        | 0,2                 | 3497           | 3899   |
| 3-DÍAS MÍNIMO [m3/s]         | 3829                       | 0,2                 | 6488                        | 0,2                 | 3516           | 3922   |
| 7-DÍAS MÍNIMO [m3/s]         | 3899                       | 0,2                 | 6536                        | 0,1                 | 3571           | 4000   |
| 30-DÍAS MÍNIMO [m3/s]        | 4283                       | 0,2                 | 6919                        | 0,1                 | 4050           | 4425   |
| 90-DÍAS MÍNIMO [m3/s]        | 5351                       | 0,1                 | 7613                        | 0,1                 | 5158           | 5622   |
| 1-DÍA MÁXIMO [m3/s]          | 21800                      | 0,3                 | 14300                       | 0,4                 | 20300          | 23870  |
| 3-DÍAS MÁXIMO [m3/s]         | 21600                      | 0,3                 | 13790                       | 0,4                 | 20140          | 23460  |
| 7-DÍAS MÁXIMO [m3/s]         | 20710                      | 0,4                 | 13230                       | 0,5                 | 19330          | 22990  |
| 30-DÍAS MÁXIMO [m3/s]        | 17230                      | 0,3                 | 11700                       | 0,5                 | 16630          | 18500  |
| 90-DÍAS MÁXIMO [m3/s]        | 15040                      | 0,2                 | 10270                       | 0,3                 | 13950          | 15750  |
| CAUDAL CERO [días]           | 0,0                        | 0,0                 | 0,0                         | 0,0                 | 0,0            | 0,0    |
| INDICE CAUDAL BASE [-]       | 0,4                        | 0,2                 | 0,7                         | 0,1                 | 0,4            | 0,5    |
| <b>PARÁMETROS GRUPO 3</b>    |                            |                     |                             |                     |                |        |
| FECHA DE CAUDAL MÍN          | 265,0                      | 0,1                 | 262,0                       | 0,3                 | 254,9          | 276,4  |
| FECHA DE CAUDAL MÁX          | 39,5                       | 0,1                 | 60,0                        | 0,1                 | 28,7           | 61,1   |
| <b>PARÁMETROS GRUPO 4</b>    |                            |                     |                             |                     |                |        |
| CONTEO PULSOS BAJOS          | 4,0                        | 1,1                 | 0,0                         | 0,0                 | 3,0            | 6,0    |
| DURACIÓN PULSOS BAJOS [días] | 13,3                       | 1,7                 | 2,5                         | 4,0                 | 7,9            | 22,4   |
| CONTEO PULSOS ALTOS          | 3,0                        | 0,7                 | 3,5                         | 1,4                 | 2,9            | 4,0    |
| DURACIÓN PULSOS ALTOS [días] | 25,0                       | 1,4                 | 4,0                         | 1,9                 | 12,2           | 27,0   |
| <b>PARÁMETROS GRUPO 5</b>    |                            |                     |                             |                     |                |        |
| TASA DE SUBIDA [-]           | 207,5                      | 0,3                 | 347,0                       | 0,4                 | 184,3          | 225,6  |
| TASA DE BAJADA [-]           | -156,5                     | -0,4                | -344,5                      | -0,5                | -194,1         | -149,0 |
| NÚMERO DE REVERSAS           | 68,0                       | 0,9                 | 155,5                       | 0,1                 | 59,9           | 105,7  |

Tabla 5.4. Valor de la alteración hidrológica, HA, para cada índice y categoría RVA, en Porto Sao José y para los años 1994-2014.

|                           | CATEGORÍA MEDIA DE RVA | CATEGORÍA ALTO DE RVA | CATEGORÍA BAJO DE RVA |
|---------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
|                           | Alteración [-]         | Alteración [-]        | Alteración [-]        |
| <b>PARÁMETROS GRUPO 1</b> |                        |                       |                       |
| OCTUBRE                   | -0,88                  | 2,17                  | -1,00                 |
| NOVIEMBRE                 | -1,00                  | 2,17                  | -0,83                 |
| DICIEMBRE                 | 0,50                   | -0,83                 | 0,17                  |

|                           |       |       |       |
|---------------------------|-------|-------|-------|
| ENERO                     | -0,50 | -0,83 | 1,50  |
| FEBRERO                   | -0,88 | -0,50 | 1,67  |
| MARZO                     | -1,00 | -0,83 | 2,17  |
| ABRIL                     | -0,13 | -0,67 | 0,83  |
| MAYO                      | -0,25 | 0,83  | -0,50 |
| JUNIO                     | -0,75 | 1,67  | -0,67 |
| JULIO                     | -1,00 | 2,00  | -0,67 |
| AGOSTO                    | -1,00 | 2,33  | -1,00 |
| SEPTIEMBRE                | -1,00 | 2,33  | -1,00 |
| <b>PARÁMETROS GRUPO 2</b> |       |       |       |
| 1-DÍA MÍNIMO              | -1,00 | 2,33  | -1,00 |
| 3-DÍAS MÍNIMO             | -1,00 | 2,33  | -1,00 |
| 7-DÍAS MÍNIMO             | -1,00 | 2,33  | -1,00 |
| 30-DÍAS MÍNIMO            | -1,00 | 2,33  | -1,00 |
| 90-DÍAS MÍNIMO            | -0,75 | 2,00  | -1,00 |
| 1-DÍA MÁXIMO              | -0,63 | -0,83 | 1,67  |
| 3-DÍAS MÁXIMO             | -0,63 | -0,83 | 1,67  |
| 7-DÍAS MÁXIMO             | -0,50 | -0,83 | 1,50  |
| 30-DÍAS MÁXIMO            | -0,75 | -0,50 | 1,50  |
| 90-DÍAS MÁXIMO            | -0,75 | -0,83 | 1,83  |
| NÚM DÍAS CAUDAL CERO      | 0,00  | 0,00  | 0,00  |
| INDICE CAUDAL BASE        | -1,00 | 2,33  | -1,00 |
| <b>PARÁMETROS GRUPO 3</b> |       |       |       |
| FECHA DE CAUDAL MÍN       | -0,63 | 0,33  | 0,50  |
| FECHA DE CAUDAL MÁX       | 0,13  | 0,50  | -0,67 |
| <b>PARÁMETROS GRUPO 4</b> |       |       |       |
| CONTEO PULSOS BAJOS       | -0,90 | -0,60 | 2,40  |
| DURACIÓN PULSOS BAJ       | -0,75 | -1,00 | -0,50 |
| CONTEO PULSOS ALTOS       | -0,60 | 1,00  | 0,33  |
| DURACIÓN PULSOS ALT       | -0,75 | -0,60 | 1,50  |
| <b>PARÁMETROS GRUPO 5</b> |       |       |       |
| TASA DE SUBIDA            | -0,88 | 1,83  | -0,67 |
| TASA DE BAJADA            | -1,00 | -0,67 | 2,00  |
| NÚMERO DE REVERSAS        | -1,00 | 2,33  | -1,00 |
| MÁXIMO                    | 1,00  | 2,33  | 2,40  |
| MÍNIMO                    | 0,00  | 0,00  | 0,00  |
| PROMEDIO ABSOLUTO         | 0,74  | 1,32  | 1,08  |

En la *Figura 5.27* se presenta un gráfico con el mayor valor de alteración hidrológica, según categoría, para cada índice IHA.

Se puede observar en los meses húmedos, excepto mayo, que los caudales promedio aumentan en la categoría baja, es decir, hay más caudales entre los percentiles menores al 33 y menos en las otras dos categorías (ver sección 4.4). Por lo tanto, el caudal en estos meses tiene una menor magnitud.

Por otro lado, en los meses secos los caudales promedios aumentan en la categoría alta, es decir, tienen un mayor valor. También aumenta la categoría alta para los mínimos y la baja para los máximos. Con respecto a los pulsos, los bajos y altos disminuyen su duración, sin embargo, los altos aumentan su cantidad, mientras que los bajos la disminuyen.

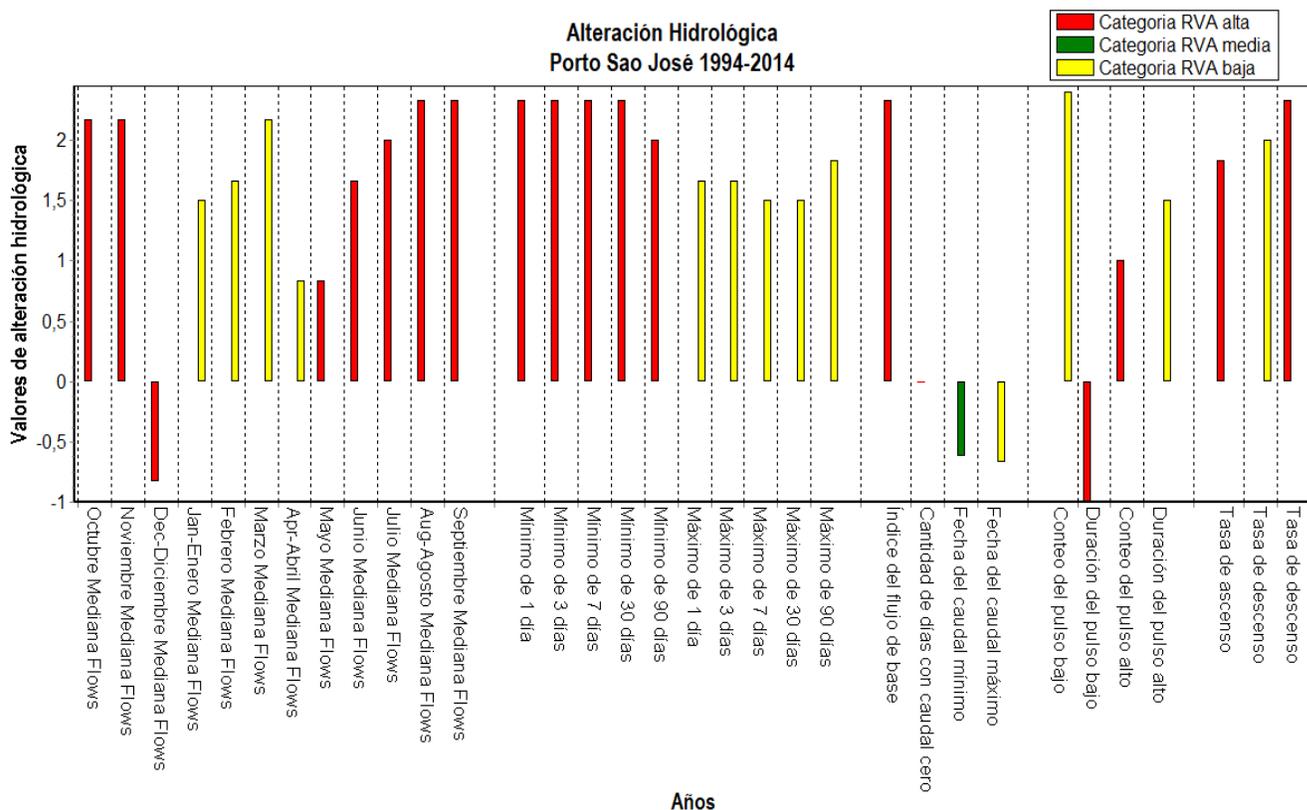


Figura 5.27. Mayor alteración hidrológica entre las tres categorías para cada índice, en Porto Sao José y para los años 1994-2014.

Se identificaron los índices que muestran una mayor alteración respecto al régimen natural (ver Tabla 5.4). En las Figuras 5.28 y 5.29 se presentan las series del indicador “conteo del pulso bajo” e “índice de caudal base”, respectivamente.

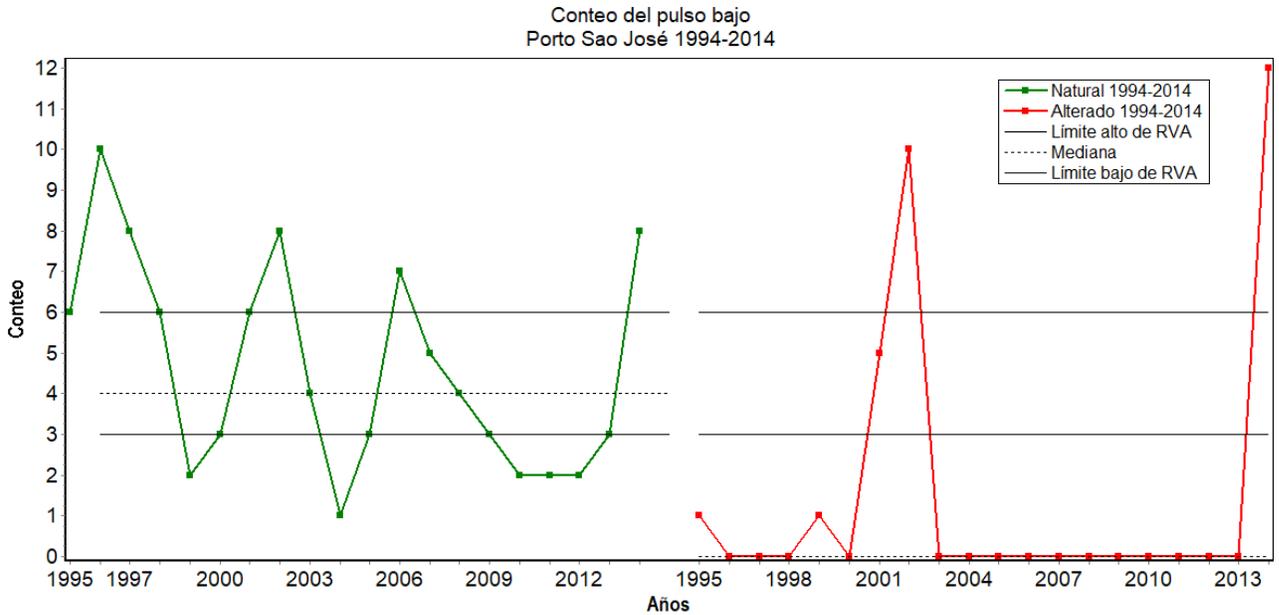


Figura 5.28. Valor del índice IHA conteo de pulsos bajos, para el periodo natural y alterado, en Porto Sao José y para los años 1994-2014.

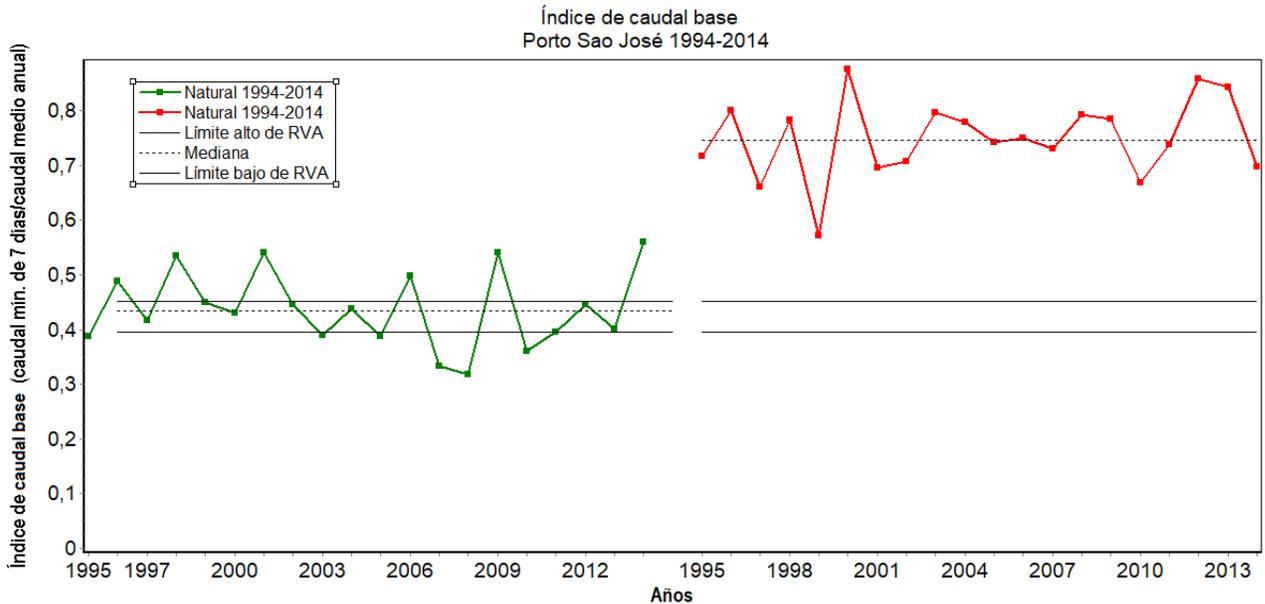


Figura 5.29. Valor del índice IHA caudal base, para el periodo natural y alterado, en Porto Sao José y para los años 1994-2014.

### 5.3.2 Porto Primavera

En esta sección se muestran los resultados de la alteración producida por todos los embalses construidos aguas arriba de Porto Primavera. Este lugar se encuentra antes de la confluencia con el río paranapanema, por lo tanto, incluye solo la alteración producida por Porto Primavera y los embalses aguas arriba de este (ver Figura 3.1). Se analizan series de caudales entre los años 1998-2018.

Se presenta en la Tabla 5.5 el valor de la mediana para los 33 índices IHA y en la Tabla 5.6 el valor de la alteración hidrológica, HA, para cada uno de estos.

Tabla 5.5. Tabla resumen con el valor de los índices IHA y límites para generar las tres categorías RVA, en Porto Primavera y para los años 1998-2018.

|                              | PERIODO NATURAL: 1998-2018 |                     | PERIODO ALTERADO: 1998-2018 |                     | LÍMITES DE RVA |       |
|------------------------------|----------------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------|----------------|-------|
|                              | Medianas                   | Coef. de Dispersión | Medianas                    | Coef. de Dispersión | Bajo           | Alto  |
| <b>PARÁMETROS GRUPO 1</b>    |                            |                     |                             |                     |                |       |
| OCTUBRE [m3/s]               | 3930                       | 0,4                 | 6839                        | 0,1                 | 3534           | 4771  |
| NOVIEMBRE [m3/s]             | 5147                       | 0,2                 | 6342                        | 0,2                 | 4855           | 5206  |
| DICIEMBRE [m3/s]             | 7983                       | 0,2                 | 6749                        | 0,3                 | 7071           | 8226  |
| ENERO [m3/s]                 | 10930                      | 0,6                 | 7188                        | 0,3                 | 8977           | 13280 |
| FEBRERO [m3/s]               | 11910                      | 0,3                 | 7915                        | 0,2                 | 10700          | 13290 |
| MARZO [m3/s]                 | 11760                      | 0,3                 | 8127                        | 0,3                 | 9931           | 12430 |
| ABRIL [m3/s]                 | 8036                       | 0,4                 | 7497                        | 0,3                 | 7269           | 9986  |
| MAYO [m3/s]                  | 6500                       | 0,2                 | 6813                        | 0,2                 | 6154           | 6804  |
| JUNIO [m3/s]                 | 5837                       | 0,3                 | 6444                        | 0,3                 | 5215           | 6142  |
| JULIO [m3/s]                 | 4790                       | 0,2                 | 6152                        | 0,3                 | 4472           | 5196  |
| AGOSTO [m3/s]                | 3942                       | 0,2                 | 6345                        | 0,3                 | 3821           | 4220  |
| SEPTIEMBRE [m3/s]            | 3716                       | 0,2                 | 6670                        | 0,2                 | 3450           | 3878  |
| <b>PARÁMETROS GRUPO 2</b>    |                            |                     |                             |                     |                |       |
| 1-DÍA MÍNIMO [m3/s]          | 2859                       | 0,2                 | 5323                        | 0,3                 | 2669           | 3126  |
| 3-DÍAS MÍNIMO [m3/s]         | 2899                       | 0,2                 | 5348                        | 0,4                 | 2736           | 3152  |
| 7-DÍAS MÍNIMO [m3/s]         | 2967                       | 0,2                 | 5395                        | 0,3                 | 2782           | 3236  |
| 30-DÍAS MÍNIMO [m3/s]        | 3351                       | 0,2                 | 5678                        | 0,3                 | 3193           | 3485  |
| 90-DÍAS MÍNIMO [m3/s]        | 4271                       | 0,1                 | 6106                        | 0,3                 | 4041           | 4458  |
| 1-DÍA MÁXIMO [m3/s]          | 18520                      | 0,3                 | 13250                       | 0,4                 | 17640          | 19770 |
| 3-DÍAS MÁXIMO [m3/s]         | 18360                      | 0,3                 | 12990                       | 0,4                 | 17430          | 19590 |
| 7-DÍAS MÁXIMO [m3/s]         | 17880                      | 0,3                 | 11810                       | 0,4                 | 16470          | 18770 |
| 30-DÍAS MÁXIMO [m3/s]        | 15210                      | 0,3                 | 9646                        | 0,3                 | 14420          | 15670 |
| 90-DÍAS MÁXIMO [m3/s]        | 12700                      | 0,3                 | 8333                        | 0,3                 | 11770          | 13410 |
| CAUDAL CERO [días]           | 0,0                        | 0,0                 | 0,0                         | 0,0                 | 0,0            | 0,0   |
| INDICE CAUDAL BASE [-]       | 0,4                        | 0,2                 | 0,7                         | 0,1                 | 0,4            | 0,4   |
| <b>PARÁMETROS GRUPO 3</b>    |                            |                     |                             |                     |                |       |
| FECHA DE CAUDAL MÍN          | 278,5                      | 0,1                 | 266,5                       | 0,3                 | 265,9          | 288,1 |
| FECHA DE CAUDAL MÁX          | 33,5                       | 0,1                 | 56,0                        | 0,1                 | 20,9           | 56,4  |
| <b>PARÁMETROS GRUPO 4</b>    |                            |                     |                             |                     |                |       |
| CONTEO PULSOS BAJOS          | 2,5                        | 0,8                 | 0,0                         | 0,0                 | 2,0            | 4,0   |
| DURACIÓN PULSOS BAJOS [días] | 24,8                       | 1,9                 | 2,0                         | 4,0                 | 8,9            | 46,7  |
| CONTEO PULSOS ALTOS          | 3,0                        | 0,6                 | 4,0                         | 1,7                 | 2,0            | 3,0   |
| DURACIÓN PULSOS ALTOS [días] | 43,0                       | 1,3                 | 3,0                         | 1,5                 | 14,1           | 50,6  |
| <b>PARÁMETROS GRUPO 5</b>    |                            |                     |                             |                     |                |       |
| TASA DE SUBIDA [-]           | 141,0                      | 0,3                 | 391,8                       | 0,5                 | 126,4          | 156,9 |
| TASA DE BAJADA [-]           | -101,5                     | -0,6                | -400,8                      | -0,5                | -118,5         | -92,6 |
| NÚMERO DE REVERSAS           | 60,0                       | 0,3                 | 189,5                       | 0,1                 | 54,9           | 64,4  |

Tabla 5.6. Valor de la alteración hidrológica, HA, para cada índice y categoría RVA, en Porto Primavera y para los años 1998-2018.

|                           | CATEGORÍA MEDIA DE RVA | CATEGORÍA ALTO DE RVA | CATEGORÍA BAJO DE RVA |
|---------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
|                           | Alteración [-]         | Alteración [-]        | Alteración [-]        |
| <b>PARÁMETROS GRUPO 1</b> |                        |                       |                       |

|                           |       |       |       |
|---------------------------|-------|-------|-------|
| OCTUBRE                   | -0,75 | 2,00  | -1,00 |
| NOVIEMBRE                 | -0,88 | 2,00  | -0,83 |
| DICIEMBRE                 | -0,25 | -0,67 | 1,00  |
| ENERO                     | -0,75 | -0,67 | 1,67  |
| FEBRERO                   | -0,88 | -0,83 | 2,00  |
| MARZO                     | -0,88 | -0,83 | 2,00  |
| ABRIL                     | 0,25  | -0,67 | 0,33  |
| MAYO                      | -0,63 | 0,67  | 0,17  |
| JUNIO                     | -0,50 | 1,00  | -0,33 |
| JULIO                     | -0,89 | 2,00  | -0,33 |
| AGOSTO                    | -0,88 | 2,00  | -0,83 |
| SEPTIEMBRE                | -1,00 | 2,33  | -1,00 |
| <b>PARÁMETROS GRUPO 2</b> |       |       |       |
| 1-DÍA MÍNIMO              | -1,00 | 2,33  | -1,00 |
| 3-DÍAS MÍNIMO             | -1,00 | 2,33  | -1,00 |
| 7-DÍAS MÍNIMO             | -0,88 | 2,17  | -1,00 |
| 30-DÍAS MÍNIMO            | -1,00 | 2,33  | -1,00 |
| 90-DÍAS MÍNIMO            | -1,00 | 2,00  | -0,67 |
| 1-DÍA MÁXIMO              | -0,88 | -0,83 | 2,00  |
| 3-DÍAS MÁXIMO             | -0,75 | -0,83 | 1,83  |
| 7-DÍAS MÁXIMO             | -0,63 | -0,83 | 1,67  |
| 30-DÍAS MÁXIMO            | -0,88 | -0,67 | 1,83  |
| 90-DÍAS MÁXIMO            | -0,88 | -0,67 | 1,83  |
| NÚM DÍAS CAUDAL CERO      | 0,00  |       |       |
| INDICE CAUDAL BASE        | -1,00 | 2,33  | -1,00 |
| <b>PARÁMETROS GRUPO 3</b> |       |       |       |
| FECHA DE CAUDAL MÍN       | -0,63 | 0,17  | 0,67  |
| FECHA DE CAUDAL MÁX       | 0,13  | 0,67  | -0,83 |
| <b>PARÁMETROS GRUPO 4</b> |       |       |       |
| CONTEO PULSOS BAJOS       | -0,83 | 0,25  | 2,25  |
| DURACIÓN PULSOS BAJ       | -0,75 | -1,00 | -0,17 |
| CONTEO PULSOS ALTOS       | -0,64 | 1,75  | 0,00  |
| DURACIÓN PULSOS ALT       | -0,88 | -0,83 | 1,50  |
| <b>PARÁMETROS GRUPO 5</b> |       |       |       |
| TASA DE SUBIDA            | -1,00 | 2,33  | -1,00 |
| TASA DE BAJADA            | -1,00 | -1,00 | 2,33  |
| NÚMERO DE REVERSAS        | -1,00 | 2,33  | -1,00 |
| MÁXIMO                    | 1,00  | 2,33  | 2,33  |
| MÍNIMO                    | 0,00  | 0,00  | 0,00  |
| PROMEDIO ABSOLUTO         | 0,76  | 1,31  | 1,09  |

En la *Figura 5.30* se presenta un gráfico con el mayor valor de alteración hidrológica, según categoría, para cada índice IHA.

Se puede observar en los meses húmedos, excepto mayo, que los caudales promedio aumentan en la categoría baja, es decir, hay más caudales entre los percentiles menores al 33 y menos en las otras dos categorías (ver sección 4.4). Por lo tanto, el caudal en estos meses tiene una menor magnitud.

Por otro lado, en los meses secos los caudales promedios aumentan en la categoría alta, es decir, tienen un mayor valor. También aumenta la categoría alta para los mínimos y la baja para los máximos. Con respecto a los pulsos, los bajos y altos disminuyen su

duración, sin embargo, los altos aumentan su cantidad, mientras que los bajos la disminuyen.

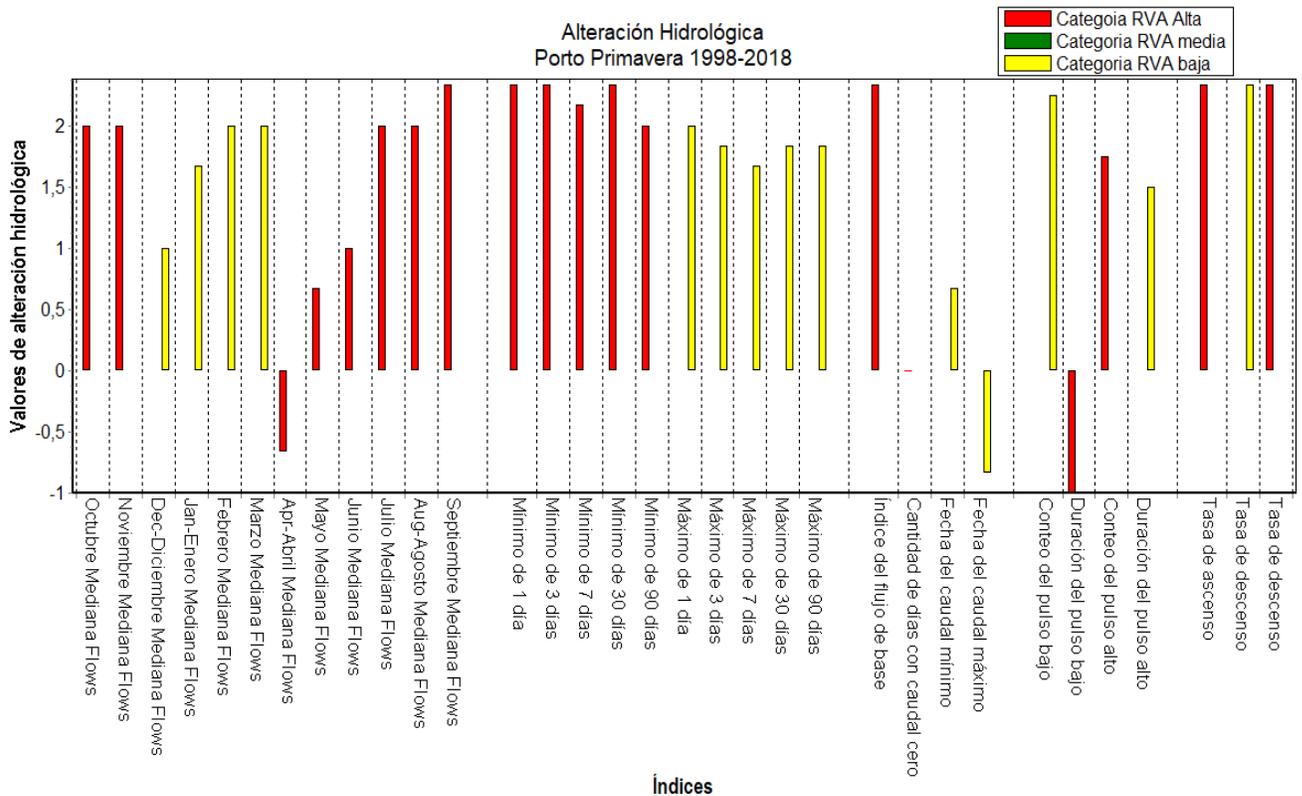


Figura 5.30. Mayor alteración hidrológica entre las tres categorías, para cada índice, en Porto Primavera y para los años 1998-2018.

Se identificaron los índices que muestran una mayor alteración respecto al régimen natural (ver Tabla 5.6). En las Figuras 5.31 y 5.32 se presentan las series del indicador “índice de caudal base” y “mínimo de 1 día”, respectivamente.

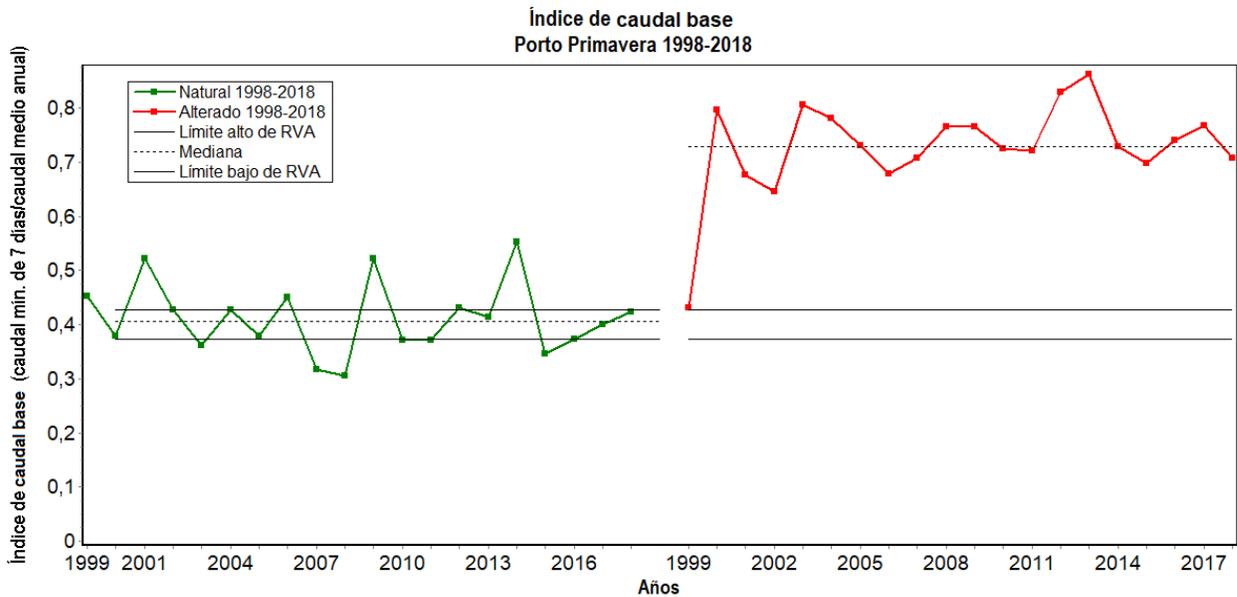


Figura 5.31. Valor del índice IHA caudal base, para el periodo natural y alterado, en Porto Primavera y para los años 1998-2018.

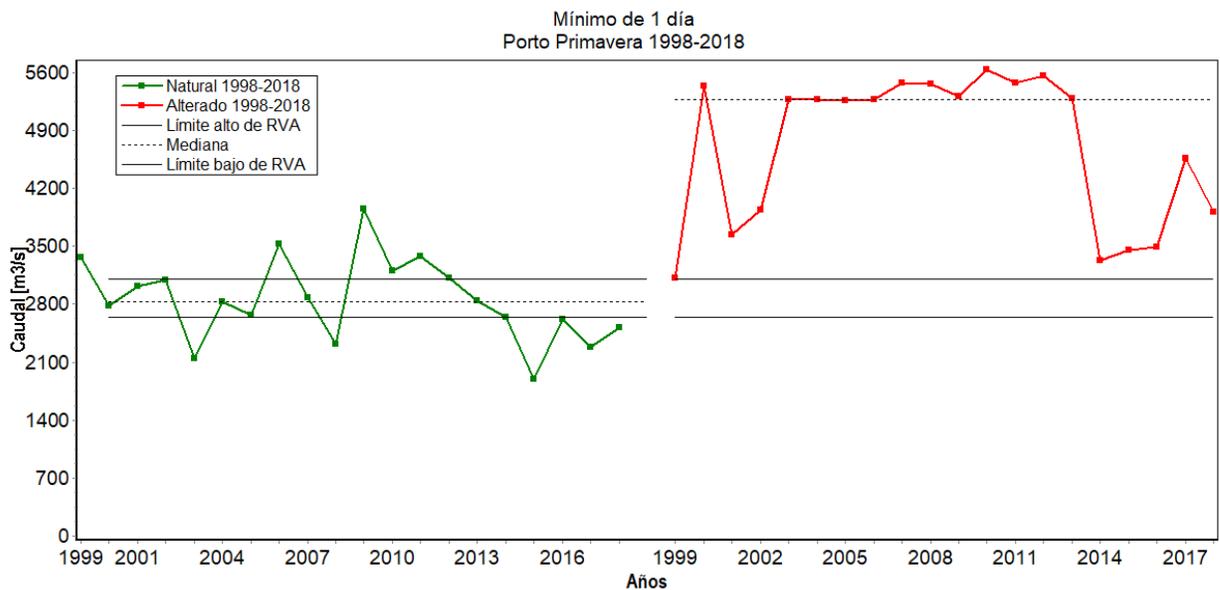


Figura 5.32. Valor del índice IHA mínimo de 1 día, para el periodo natural y alterado, en Porto Primavera y para los años 1998-2018.

### 5.3.3 Rosana

En esta sección se muestran los resultados de alteración producida por todos los embalses construidos aguas arriba de Rosana, por el río Paranapanema (ver Figura 3.1). Se analizan series de caudales entre los años 1993-2018.

Se presenta en la Tabla 5.7 el valor de la mediana para los 33 índices IHA y en la Tabla 5.8 el valor de la alteración hidrológica, HA, para cada uno de estos.

Tabla 5.7. Tabla resumen con el valor de los índices IHA y límites para generar las tres categorías RVA, en Rosana y para los años 1993-2018.

|                              | PERIODO NATURAL: 1993-2018 |                     | PERIODO ALTERADO: 1993-2018 |                     | LÍMITES DE RVA |       |
|------------------------------|----------------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------|----------------|-------|
|                              | Medianas                   | Coef. de Dispersión | Medianas                    | Coef. de Dispersión | Bajo           | Alto  |
| <b>PARÁMETROS GRUPO 1</b>    |                            |                     |                             |                     |                |       |
| OCTUBRE [m3/s]               | 1306                       | 0,7                 | 1352                        | 0,3                 | 1000           | 1617  |
| NOVIEMBRE [m3/s]             | 1074                       | 0,4                 | 1362                        | 0,3                 | 960            | 1282  |
| DICIEMBRE [m3/s]             | 1230                       | 0,5                 | 1317                        | 0,3                 | 1145           | 1418  |
| ENERO [m3/s]                 | 1631                       | 0,7                 | 1464                        | 0,6                 | 1401           | 2118  |
| FEBRERO [m3/s]               | 1934                       | 0,5                 | 1524                        | 0,4                 | 1663           | 2190  |
| MARZO [m3/s]                 | 1548                       | 0,4                 | 1406                        | 0,3                 | 1243           | 1683  |
| ABRIL [m3/s]                 | 1247                       | 0,4                 | 1316                        | 0,3                 | 1008           | 1382  |
| MAYO [m3/s]                  | 1046                       | 0,4                 | 1187                        | 0,2                 | 932            | 1232  |
| JUNIO [m3/s]                 | 1134                       | 0,8                 | 1165                        | 0,4                 | 923            | 1452  |
| JULIO [m3/s]                 | 1123                       | 0,6                 | 1261                        | 0,3                 | 988            | 1432  |
| AGOSTO [m3/s]                | 887                        | 0,5                 | 1335                        | 0,2                 | 803            | 1094  |
| SEPTIEMBRE [m3/s]            | 925                        | 0,5                 | 1293                        | 0,3                 | 800            | 1079  |
| <b>PARÁMETROS GRUPO 2</b>    |                            |                     |                             |                     |                |       |
| 1-DÍA MÍNIMO [m3/s]          | 627                        | 0,3                 | 604                         | 0,3                 | 561            | 658   |
| 3-DÍAS MÍNIMO [m3/s]         | 641                        | 0,3                 | 698                         | 0,3                 | 576            | 673   |
| 7-DÍAS MÍNIMO [m3/s]         | 646                        | 0,2                 | 795                         | 0,2                 | 594            | 694   |
| 30-DÍAS MÍNIMO [m3/s]        | 745                        | 0,3                 | 986                         | 0,2                 | 688            | 772   |
| 90-DÍAS MÍNIMO [m3/s]        | 898                        | 0,3                 | 1100                        | 0,2                 | 881            | 994   |
| 1-DÍA MÁXIMO [m3/s]          | 4890                       | 0,7                 | 5169                        | 0,6                 | 4466           | 6405  |
| 3-DÍAS MÁXIMO [m3/s]         | 4454                       | 0,7                 | 4996                        | 0,6                 | 4292           | 6126  |
| 7-DÍAS MÁXIMO [m3/s]         | 3907                       | 0,8                 | 3765                        | 0,7                 | 3611           | 5181  |
| 30-DÍAS MÁXIMO [m3/s]        | 2930                       | 0,5                 | 2549                        | 0,7                 | 2598           | 3630  |
| 90-DÍAS MÁXIMO [m3/s]        | 2156                       | 0,4                 | 1704                        | 0,5                 | 1956           | 2347  |
| CAUDAL CERO [días]           | 0,0                        | 0,0                 | 0,0                         | 0,0                 | 0,0            | 0,0   |
| INDICE CAUDAL BASE [-]       | 0,4                        | 0,2                 | 0,6                         | 0,2                 | 0,4            | 0,5   |
| <b>PARÁMETROS GRUPO 3</b>    |                            |                     |                             |                     |                |       |
| FECHA DE CAUDAL MÍN          | 271,0                      | 0,1                 | 126,0                       | 0,3                 | 249,5          | 280,7 |
| FECHA DE CAUDAL MÁX          | 48,0                       | 0,4                 | 29,0                        | 0,4                 | 30,2           | 167,0 |
| <b>PARÁMETROS GRUPO 4</b>    |                            |                     |                             |                     |                |       |
| CONTEO PULSOS BAJOS          | 7,0                        | 0,5                 | 26,0                        | 0,9                 | 5,0            | 8,0   |
| DURACIÓN PULSOS BAJOS [días] | 11,0                       | 0,8                 | 1,0                         | 0,0                 | 7,9            | 13,6  |
| CONTEO PULSOS ALTOS          | 6,0                        | 0,5                 | 10,0                        | 1,0                 | 5,0            | 8,0   |
| DURACIÓN PULSOS ALTOS [días] | 6,0                        | 0,6                 | 2,0                         | 1,5                 | 5,3            | 7,0   |
| <b>PARÁMETROS GRUPO 5</b>    |                            |                     |                             |                     |                |       |
| TASA DE SUBIDA [-]           | 56,0                       | 0,6                 | 142,0                       | 0,4                 | 48,3           | 76,3  |
| TASA DE BAJADA [-]           | -48,0                      | -0,4                | -145,5                      | -0,3                | -49,4          | -37,8 |
| NÚMERO DE REVERSAS           | 65,0                       | 0,2                 | 189,0                       | 0,1                 | 63,6           | 70,4  |

Tabla 5.8. Valor de la alteración hidrológica, HA, para cada índice y categoría RVA, en Rosana y para los años 1993-2018.

|                           | CATEGORÍA MEDIA DE RVA | CATEGORÍA ALTO DE RVA | CATEGORÍA BAJO DE RVA |
|---------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
|                           | Alteración [-]         | Alteración [-]        | Alteración [-]        |
| <b>PARÁMETROS GRUPO 1</b> |                        |                       |                       |
| OCTUBRE                   | 0,89                   | -0,13                 | -0,88                 |
| NOVIEMBRE                 | -0,33                  | 1,13                  | -0,75                 |
| DICIEMBRE                 | 0,33                   | 0,13                  | -0,50                 |
| ENERO                     | -0,22                  | -0,25                 | 0,50                  |
| FEBRERO                   | -0,67                  | -0,25                 | 1,00                  |

|                           |       |       |       |
|---------------------------|-------|-------|-------|
| MARZO                     | 0,22  | -0,38 | 0,13  |
| ABRIL                     | 0,11  | 0,13  | -0,25 |
| MAYO                      | 0,11  | 0,38  | -0,50 |
| JUNIO                     | 0,78  | -0,25 | -0,63 |
| JULIO                     | 0,78  | -0,13 | -0,75 |
| AGOSTO                    | -0,56 | 1,63  | -1,00 |
| SEPTIEMBRE                | -0,40 | 1,38  | -1,00 |
| <b>PARÁMETROS GRUPO 2</b> |       |       |       |
| 1-DÍA MÍNIMO              | 0,00  | -0,25 | 0,25  |
| 3-DÍAS MÍNIMO             | 0,00  | 0,88  | -0,88 |
| 7-DÍAS MÍNIMO             | -0,56 | 1,63  | -1,00 |
| 30-DÍAS MÍNIMO            | -0,78 | 1,88  | -1,00 |
| 90-DÍAS MÍNIMO            | -0,56 | 1,25  | -0,63 |
| 1-DÍA MÁXIMO              | 0,00  | -0,25 | 0,25  |
| 3-DÍAS MÁXIMO             | 0,11  | -0,38 | 0,25  |
| 7-DÍAS MÁXIMO             | -0,11 | -0,38 | 0,50  |
| 30-DÍAS MÁXIMO            | -0,11 | -0,50 | 0,63  |
| 90-DÍAS MÁXIMO            | -0,56 | -0,38 | 1,00  |
| NÚM DÍAS CAUDAL CERO      | 0,00  |       |       |
| INDICE CAUDAL BASE        | -0,78 | 1,75  | -0,88 |
| <b>PARÁMETROS GRUPO 3</b> |       |       |       |
| FECHA DE CAUDAL MÍN       | -0,78 | -0,75 | 1,63  |
| FECHA DE CAUDAL MÁX       | -0,33 | 0,13  | 0,25  |
| <b>PARÁMETROS GRUPO 4</b> |       |       |       |
| CONTEO PULSOS BAJOS       | -0,88 | 5,67  | -0,50 |
| DURACIÓN PULSOS BAJ       | -1,00 | -1,00 | 2,29  |
| CONTEO PULSOS ALTOS       | -0,74 | 3,33  | 1,33  |
| DURACIÓN PULSOS ALT       | -0,60 | -1,00 | 1,50  |
| <b>PARÁMETROS GRUPO 5</b> |       |       |       |
| TASA DE SUBIDA            | -1,00 | 2,13  | -1,00 |
| TASA DE BAJADA            | -1,00 | -1,00 | 2,13  |
| NÚMERO DE REVERSAS        | -1,00 | 2,13  | -1,00 |
| MÁXIMO                    | 1,00  | 5,67  | 2,29  |
| MÍNIMO                    | 0,00  | 0,00  | 0,00  |
| PROMEDIO ABSOLUTO         | 0,49  | 0,99  | 0,81  |

En la *Figura 5.33* se presenta un gráfico con el mayor valor de alteración hidrológica, según categoría, para cada índice IHA.

Se puede observar que, a diferencia de Porto Sao José y Porto Primavera, no existe un patrón tan definido de alteración, con respecto a los meses húmedos y secos o los máximos y mínimos. Con respecto a los pulsos, los bajos y altos disminuyen su duración y aumentan su cantidad.

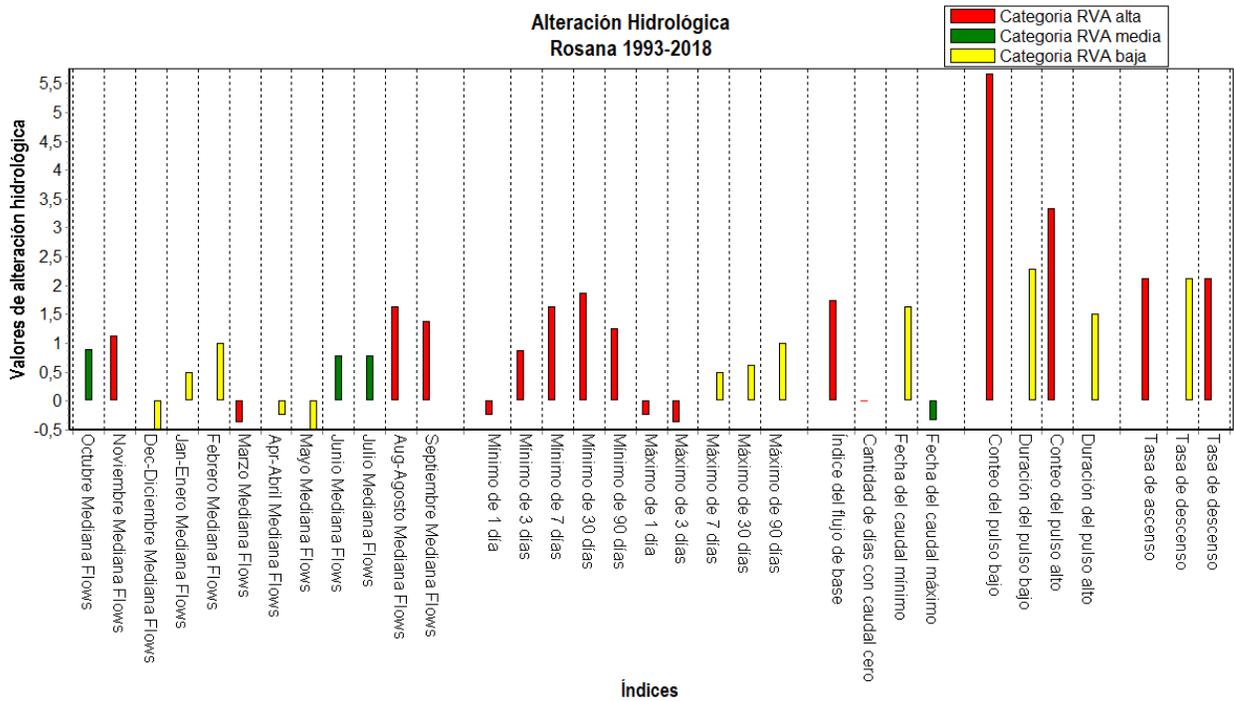


Figura 5.33. Mayor alteración hidrológica entre las tres categorías, para cada índice, en Rosana y para los años 1993-2018.

Se identificaron los índices que muestran una mayor alteración respecto al régimen natural (ver Tabla 5.6). En las Figuras 5.34 y 5.35 se presentan las series del indicador “conteo del pulso alto” y “conteo del pulso bajo”, respectivamente.

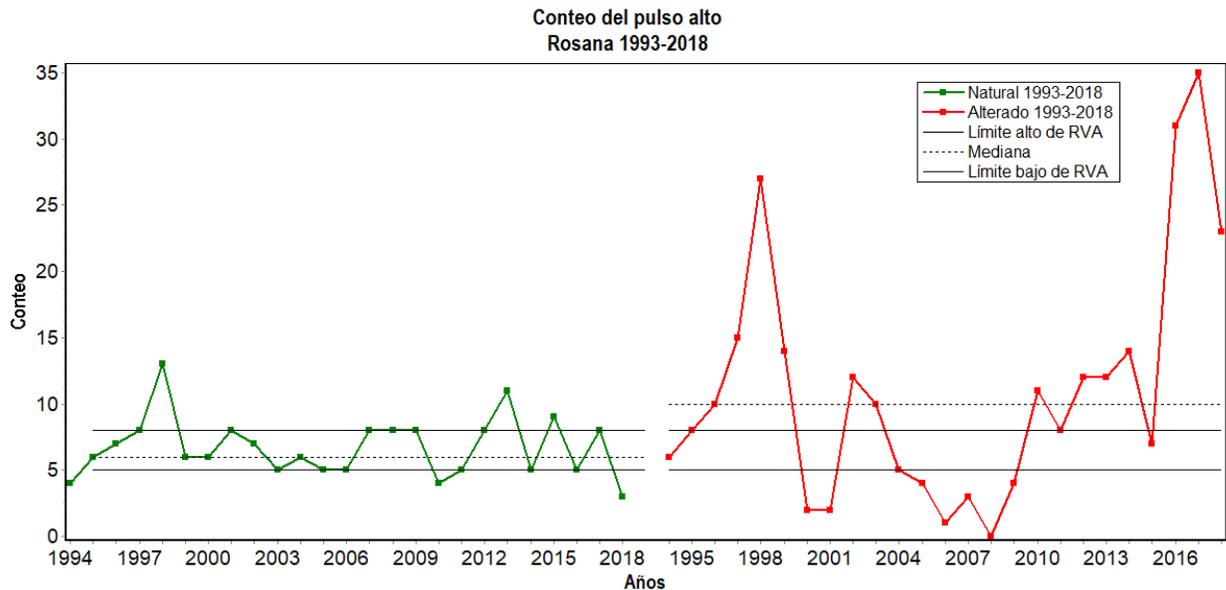


Figura 5.34. Valor del índice IHA conteo del pulso alto, para el periodo natural y alterado, en Rosana y para los años 1993-2018.

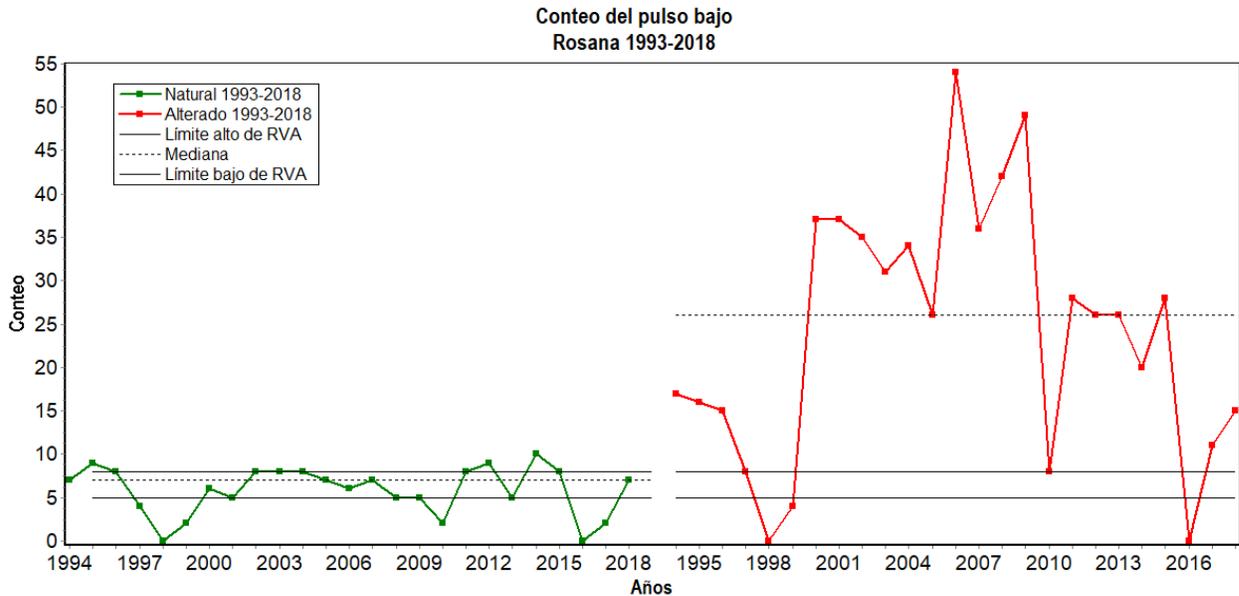


Figura 5.35. Valor del índice IHA conteo del pulso bajo, para el periodo natural y alterado, en Rosana y para los años 1993-2018.

## 5.4 Componentes del caudal ecológico

A continuación, se presentan los resultados del cálculo de los componentes del caudal ecológico, con respecto al régimen natural y alterado, a través de los 34 índices EFC (ver Tabla 4.2).

Con el fin de poder obtener una recomendación de régimen hidrológico que favorezca el servicio ecosistémico de producción de peces, se relacionan los índices hidrológicos EFC con la información de peces de la zona. Se lleva a cabo solamente en el lugar para el cual se requiere un nuevo régimen, es decir, Porto Sao José (ver Figura 3.1).

### 5.4.1 Calculo EFC Sao José

Para obtener una recomendación de régimen hidrológico se calculan los 34 índices EFC, en Sao José, para los años 1986-2014.

En la Figura 5.36 se presenta al lado izquierdo una serie de caudales naturales y al lado derecho una serie de caudales alterados, para el mismo rango de tiempo. Estas series son divididas, según el valor de los caudales, en cinco componentes; caudales extremad ante bajos, caudales bajos, pulsos de caudal alto, inundaciones pequeñas y grandes inundaciones. Se calculan índices para cada uno de estos componentes, sumando en total los 34 índices EFC. En la Tabla 5.9 se presentan los límites predeterminados por el software (ver Tabla 4.2) para cada uno de estos componentes.

Finalmente, en la Tabla 5.10 se presenta el valor de la mediana y coeficiente de dispersión para cada índice EFC, en el periodo natural y alterado.

Componentes del caudal ecológico  
Porto Sao José 1986-2014

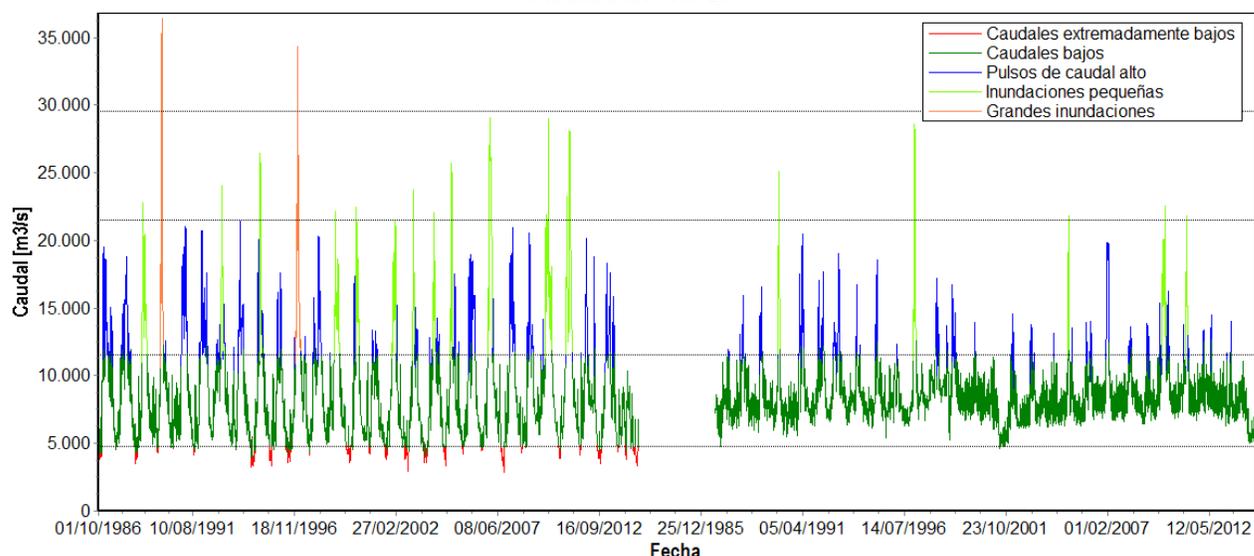


Figura 5.36. Cinco componentes del caudal ecológico, para la serie natural y alterada, en Porto Sao José y entre los años 1986-2014.

Tabla 5.9. Límites predeterminados por el software para cada componente del caudal ecológico.

| COMPONENTE                                | LIMITE [M3/S] |
|---|---------------|
| EFC UMBRAL CAUDAL BAJO:                   | 11570         |
| EFC UMBRAL CAUDAL ALTO:                   | 11570         |
| EFC UMBRAL CAUDAL EXTREMO BAJO:           | 4811          |
| EFC PEAK MÍNIMO DE PEQUEÑAS INUNDACIONES: | 21480         |
| EFC PEAK MÍNIMO DE GRANDES INUNDACIONES:  | 29590         |

Tabla 5.10. Valor de la mediana y coeficiente de dispersión para cada índice EFC, para el periodo natural y alterado.

|                            | PERIODO NATURAL: 1986-2014 |                     | PERIODO ALTERADO: 1986-2014 |                     |
|----------------------------|----------------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------|
|                            | MEDIANA                    | COEF. DE DISPERSIÓN | MEDIANA                     | COEF. DE DISPERSIÓN |
| <b>EFC CAUDALES BAJOS</b>  |                            |                     |                             |                     |
| OCT. CAUDAL BAJO [M3/S]    | 6099,0                     | 0,3                 | 8044,0                      | 0,1                 |
| NOVIEM. CAUDAL BAJO [M3/S] | 6436,0                     | 0,1                 | 7901,0                      | 0,1                 |
| DICIEM. CAUDAL BAJO [M3/S] | 8542,0                     | 0,3                 | 8266,0                      | 0,1                 |
| ENER CAUDAL BAJO [M3/S]    | 10120,0                    | 0,2                 | 8627,0                      | 0,1                 |
| FEB. CAUDAL BAJO [M3/S]    | 10350,0                    | 0,1                 | 9404,0                      | 0,2                 |
| MARZO CAUDAL BAJO [M3/S]   | 10740,0                    | 0,1                 | 9344,0                      | 0,2                 |
| ABRIL CAUDAL BAJO [M3/S]   | 9673,0                     | 0,2                 | 8907,0                      | 0,2                 |
| MAYO CAUDAL BAJO [M3/S]    | 7853,0                     | 0,2                 | 8198,0                      | 0,1                 |
| JUNIO CAUDAL BAJO [M3/S]   | 6885,0                     | 0,3                 | 8193,0                      | 0,1                 |
| JULIO CAUDAL BAJO [M3/S]   | 6135,0                     | 0,1                 | 7787,0                      | 0,1                 |
| AGOST. CAUDAL BAJO [M3/S]  | 5413,0                     | 0,2                 | 7708,0                      | 0,1                 |
| SEPT. CAUDAL BAJO [M3/S]   | 5612,0                     | 0,2                 | 7904,0                      | 0,1                 |
| <b>EFC PARÁMETROS</b>      |                            |                     |                             |                     |
| PEAK EXTR. BAJOS [M3/S]    | 4362,0                     | 0,1                 | 4788,0                      | 0,0                 |
| DUR. EXTR. BAJOS [DIAS]    | 6,0                        | 3,6                 | 1,0                         | 1,0                 |
| TEMP. EXTR. BAJOS          | 257,5                      | 0,1                 | 211,0                       | 0,3                 |
| FREC. EXTR. BAJO           | 3,0                        | 1,3                 | 0,0                         | 0,0                 |
| PEAK CAUDAL ALTO [M3/S]    | 13490,0                    | 0,2                 | 13050,0                     | 0,1                 |
| DUR. CAUDAL ALTO [DIAS]    | 8,5                        | 1,6                 | 5,0                         | 2,3                 |
| TEMP. CAUDAL ALTO          | 64,0                       | 0,2                 | 72,0                        | 0,1                 |

|                             |         |      |         |      |
|-----------------------------|---------|------|---------|------|
| FREC. CAUDAL ALTO           | 3,0     | 0,9  | 2,0     | 1,5  |
| TASA SUB. CAUDAL ALTO [-]   | 476,5   | 0,8  | 658,6   | 0,7  |
| TASA BAJ. CAUDAL ALTO [-]   | -443,0  | -0,6 | -630,0  | -0,6 |
| PEAK PEQUEÑAS INUND. [M3/S] | 23890,0 | 0,2  | 22580,0 | 0,2  |
| DUR. PEQUEÑAS INUND. [DIAS] | 72,0    | 0,6  | 35,0    | 0,9  |
| TEMP. PEQUEÑAS INUND.       | 40,0    | 0,1  | 30,0    | 0,1  |
| FREC. PEQUEÑAS INUND.       | 0,0     | 0,0  | 0,0     | 0,0  |
| TASA SUBIDA PEQ INUND. [-]  | 528,5   | 0,8  | 752,6   | 0,8  |
| TASA BAJADA PEQ INUND. [-]  | -381,4  | -0,9 | -555,9  | -0,4 |
| PEAK GRANDES INUND. [M3/S]  | 35350,0 | 0,1  |         |      |
| DUR. GRANDES INUND. [DIAS]  | 73,0    | 0,5  |         |      |
| TEMP. GRANDES INUND.        | 19,0    | 0,0  |         |      |
| FREC. GRANDES INUND.        | 0,0     | 0,0  | 0,0     | 0,0  |
| TASA SUBIDA GR INUND. [-]   | 784,1   | 0,2  |         |      |
| TASA BAJADA GR INUND. [-]   | -707,4  | -0,9 |         |      |

#### 5.4.2 Cálculo EFC Sao José con límite Suzuki et al. (2009)

Se calculan índices EFC, en Sao José, para los años 1986-2014. Sin embargo, no se utilizan los límites predeterminados por el software. Según Suzuki et al. (2009), el componente del caudal importante para el reclutamiento exitoso de juveniles del año, de 6 especies nativas, es el caudal mayor que aquel que llena el cauce. Este límite se encuentra en Santos (1991) y es de 11.270 m<sup>3</sup>/s con un intervalo de recurrencia de 1,09 años.

Así, solo se calculan seis índices para este componente del caudal. En la *Figura 5.37* se presenta al lado izquierdo una serie de caudales naturales y al lado derecho una serie de caudales alterados, para el mismo rango de tiempo. Estas series son divididas, según el valor de los caudales, en dos componentes; caudal menor a la inundación e inundación. Se calculan índices para el componente inundación. En la *Tabla 5.11* se presenta su límite.

Finalmente, en la *Tabla 5.12* se presenta el valor de la mediana y coeficiente de dispersión para cada índice EFC, en el periodo natural y alterado.

Componentes del caudal ecológico  
Porto Primavera 1986-2014

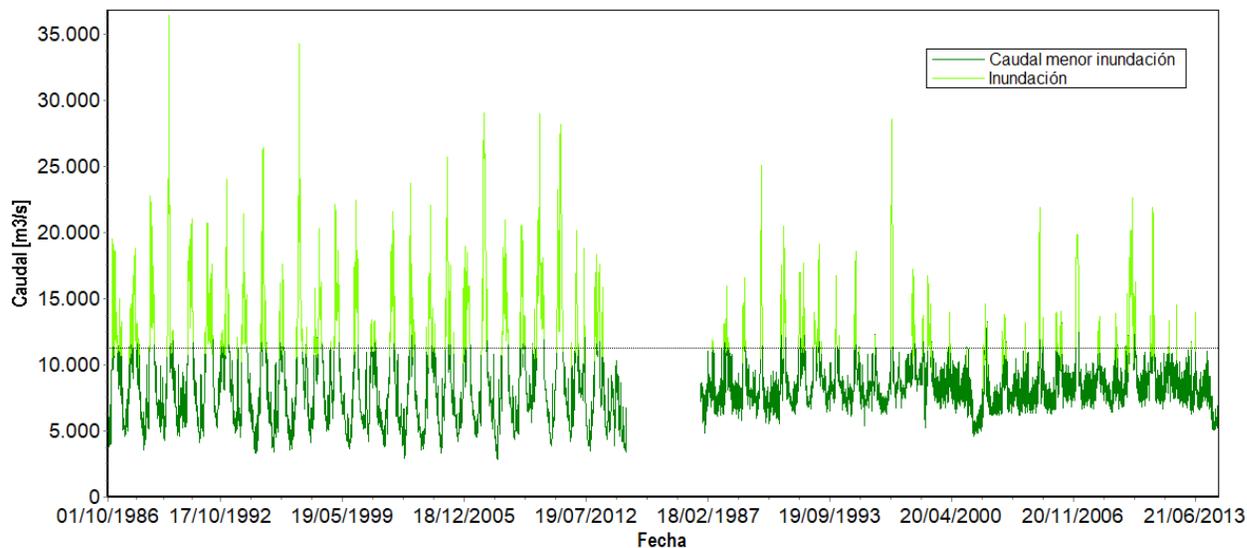


Figura 5.37. Componente del caudal ecológico (inundación), para la serie natural y alterada, en Porto Sao José y entre los años 1986-2014.

Tabla 5.11. Límite del componente del caudal ecológico (inundación), según Santos (2009).

| COMPONENTE                       | LIMITE [M3/S] |
|----------------------------------|---------------|
| EFC PEAK MINIMO DE INUNDACIONES: | 11270         |
| EFC UMBRAL CAUDAL BAJO:          | 11270         |

Tabla 5.12. Valor de la mediana y coeficiente de dispersión para cada índice EFC, para el periodo natural y alterado.

|                            | PERIODO NATURAL: 1986-2014 |                     | PERIODO ALTERADO: 1986-2014 |                     |
|----------------------------|----------------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------|
|                            | MEDIANA                    | COEF. DE DISPERSIÓN | MEDIANA                     | COEF. DE DISPERSIÓN |
| PEAK INUNDACION [M3/S]     | 15050                      | 0,4                 | 13100                       | 0,2                 |
| DURACIÓN INUNDACION [DIAS] | 22,5                       | 1,8                 | 5,0                         | 2,7                 |
| TEMPORADA INUNDACION       | 55,5                       | 0,2                 | 60,5                        | 0,1                 |
| FRECUENCIA INUNDACION      | 3,0                        | 0,9                 | 3,0                         | 1,3                 |
| TASA SUBIDA INUNDACION [-] | 509,3                      | 0,5                 | 652,8                       | 0,8                 |
| TASA BAJADA INUNDACION [-] | -419                       | -0,6                | -620                        | -0,6                |

En las Tablas 5.13 y 5.15, se observa con mayor detalle el valor de los seis índices, para los años en los que se tienen datos de peces (Figura 3.2), en la serie natural y alterada, respectivamente. También, se agregan tres índices, que según Suzuki et al. (2009) son importantes en la producción de peces, estos se presentan en la Tabla 5.14 para la serie natural y Tabla 5.16 para la serie alterada.

Tabla 5.13. Valor de seis índices EFC en la serie de caudales naturales y para años en los que se tiene información de producción de peces.

| AÑO  | MEDIANA PEAK INUND. [M3/S] | MEDIANA DURACIÓN INUND. [DIAS] | MEDIANA TEMP. INUND. | FREC. INUNDACION | MEDIANA TASA SUBIDA INUND. [-] | MEDIANA TASA BAJADA INUND. [-] |
|------|----------------------------|--------------------------------|----------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 1987 | 12130                      | 3,5                            | 105,5                | 10               | 634,4                          | -504,7                         |
| 1988 | 12560                      | 8,5                            | 94                   | 8                | 461,4                          | -473,6                         |
| 1992 | 12440                      | 6                              | 39                   | 3                | 515,0                          | -310,8                         |
| 1993 | 13230                      | 18                             | 1                    | 6                | 336,7                          | -209,5                         |

|             |       |      |      |   |       |        |
|-------------|-------|------|------|---|-------|--------|
| <b>1994</b> | 16740 | 53,5 | 337  | 2 | 950,2 | -484,4 |
| <b>2000</b> | 17390 | 15   | 23   | 3 | 670,3 | -303,5 |
| <b>2001</b> | 13300 | 10   | 51   | 3 | 379,2 | -424,4 |
| <b>2002</b> | 18360 | 45,5 | 72   | 2 | 417,2 | -637,8 |
| <b>2003</b> | 15050 | 25   | 76   | 3 | 571,7 | -249,3 |
| <b>2004</b> | 13080 | 6    | 61   | 5 | 447,8 | -549,5 |
| <b>2005</b> | 15000 | 13   | 77,5 | 4 | 587,3 | -567,4 |
| <b>2006</b> | 18500 | 27   | 11   | 3 | 809,3 | -718,9 |
| <b>2007</b> | 22380 | 56   | 52,5 | 2 | 418,0 | -500,3 |

Tabla 5.14. Valor de tres índices importantes en el desarrollo de peces, en la serie de caudales naturales y para años en los que se tiene información de producción de peces.

| <b>AÑO</b>  | <b>DURACION TOTAL INUNDACIÓN [DÍAS]</b> | <b>PEAK TOTAL INUNDACIÓN [M3/S]</b> | <b>FECHA INICIO INUNDACIÓN</b> |
|-------------|---|-------------------------------------|--------------------------------|
| <b>1987</b> | 120                                     | 19480                               | 20/12/1986                     |
| <b>1988</b> | 107                                     | 18830                               | 17/11/1987                     |
| <b>1992</b> | 131                                     | 20740                               | 20/12/1991                     |
| <b>1993</b> | 121                                     | 24060                               | 06/11/1992                     |
| <b>1994</b> | 107                                     | 21410                               | 03/10/1993                     |
| <b>2000</b> | 85                                      | 22430                               | 06/01/2000                     |
| <b>2001</b> | 37                                      | 13370                               | 18/12/2000                     |
| <b>2002</b> | 91                                      | 21540                               | 23/12/2001                     |
| <b>2003</b> | 96                                      | 23730                               | 08/01/2003                     |
| <b>2004</b> | 90                                      | 22060                               | 09/12/2003                     |
| <b>2005</b> | 84                                      | 25740                               | 25/12/2004                     |
| <b>2006</b> | 112                                     | 18940                               | 02/12/2005                     |
| <b>2007</b> | 112                                     | 29070                               | 06/12/2006                     |

Tabla 5.15. Valor de seis índices EFC en la serie de caudales alterados y para años en los que se tiene información de producción de peces.

| <b>AÑO</b>  | <b>MEDIANA PEAK INUND. [M3/S]</b> | <b>MEDIANA DURACIÓN INUND. [DIAS]</b> | <b>MEDIANA TEMP. INUND.</b> | <b>FREC. INUNDACION</b> | <b>MEDIANA TASA SUBIDA INUND. [-]</b> | <b>MEDIANA TASA BAJADA INUND. [-]</b> |
|-------------|-----------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|-------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| <b>1987</b> | 11850                             | 3,5                                   | 157,5                       | 2                       | 445,7                                 | -614,3                                |
| <b>1988</b> | 13100                             | 7                                     | 58                          | 5                       | 485,3                                 | -304,6                                |
| <b>1992</b> | 13670                             | 6                                     | 93                          | 5                       | 250,9                                 | -494,0                                |
| <b>1993</b> | 12690                             | 14                                    | 58                          | 5                       | 326,6                                 | -195,8                                |
| <b>1994</b> | 14490                             | 16                                    | 61                          | 2                       | 275,1                                 | -620,0                                |
| <b>2000</b> | 11610                             | 3                                     | 85                          | 3                       | 610,0                                 | -888,3                                |
| <b>2001</b> | 11370                             | 1                                     | 53                          | 1                       | 1536,0                                | -676,0                                |
| <b>2002</b> | 11950                             | 2                                     | 49,5                        | 6                       | 1284,0                                | -671,6                                |
| <b>2003</b> | 12550                             | 4                                     | 55                          | 5                       | 1303,0                                | -580,0                                |
| <b>2004</b> | 13180                             | 5                                     | 109                         | 1                       | 1207,0                                | -889,0                                |
| <b>2005</b> | 17700                             | 19                                    | 60,5                        | 2                       | 652,8                                 | -1163,0                               |
| <b>2006</b> | 12470                             | 2,5                                   | 48                          | 8                       | 736,9                                 | -754,8                                |
| <b>2007</b> | 19870                             | 58                                    | 45                          | 1                       | 245,7                                 | -382,2                                |

Tabla 5.16. Valor de tres índices importantes en el desarrollo de peces, en la serie de caudales alterados y para años en los que se tiene información de producción de peces.

| <b>AÑO</b>  | <b>DURACION TOTAL INUNDACIÓN [DÍAS]</b> | <b>PEAK TOTAL INUNDACIÓN [M3/S]</b> | <b>FECHA INICIO INUNDACIÓN</b> |
|-------------|---|-------------------------------------|--------------------------------|
| <b>1987</b> | 7                                       | 11920                               | 21/05/2087                     |
| <b>1988</b> | 48                                      | 15910                               | 12/01/2088                     |
| <b>1992</b> | 69                                      | 17680                               | 26/01/2092                     |
| <b>1993</b> | 107                                     | 19080                               | 12/11/2092                     |
| <b>1994</b> | 32                                      | 16740                               | 17/01/2094                     |
| <b>2000</b> | 10                                      | 13940                               | 18/02/2000                     |

|             |    |       |            |
|-------------|----|-------|------------|
| <b>2001</b> | 1  | 11370 | 22/02/2001 |
| <b>2002</b> | 19 | 14570 | 15/01/2002 |
| <b>2003</b> | 22 | 13770 | 29/01/2003 |
| <b>2004</b> | 5  | 13180 | 16/04/2004 |
| <b>2005</b> | 38 | 21860 | 13/01/2005 |
| <b>2006</b> | 42 | 14060 | 20/12/2005 |
| <b>2007</b> | 58 | 19870 | 11/01/2007 |

## 5.5 Recomendación de régimen hidrológico

De los nueve índices calculados anteriormente se seleccionan cuatro, para evitar redundancias. Estos cuatro se eligen a partir de Suzuki et al. (2009), donde se indica que la duración total, peak, frecuencia y fecha de inicio de la inundación es lo que más se relaciona con la producción de peces.

Para cada índice de la serie natural se calculan los límites RVA, es decir, se calcula el percentil 33 y 67 (límite inferior y superior, respectivamente). Estos percentiles dividen los valores naturales en tres categorías; alta, media y baja.

A continuación, se presenta el valor natural y alterado de cada índice, teniendo conocimiento de que los años con mayor reclutamiento de juveniles del año en el río Paraná son 1992, 1993 y 2007 (*Figura 3.2*), donde el río ya estaba intervenido y, por lo tanto, la serie que produce estas cantidades de peces es la alterada.

Se puede observar en la *Figura 5.38* que la duración total de la inundación es siempre menor en la serie alterada. También, los años con mayor reclutamiento son los años en los que la duración alterada es mayor. Por lo tanto, se recomienda que el valor de este índice se asemeje al natural. Así un régimen hidrológico recomendado, que beneficie la producción de peces, debiese tener su índice “duración total inundación” en la categoría media de los límites RVA. Los tres años con mejor reclutamiento son los más cercanos a esta categoría.

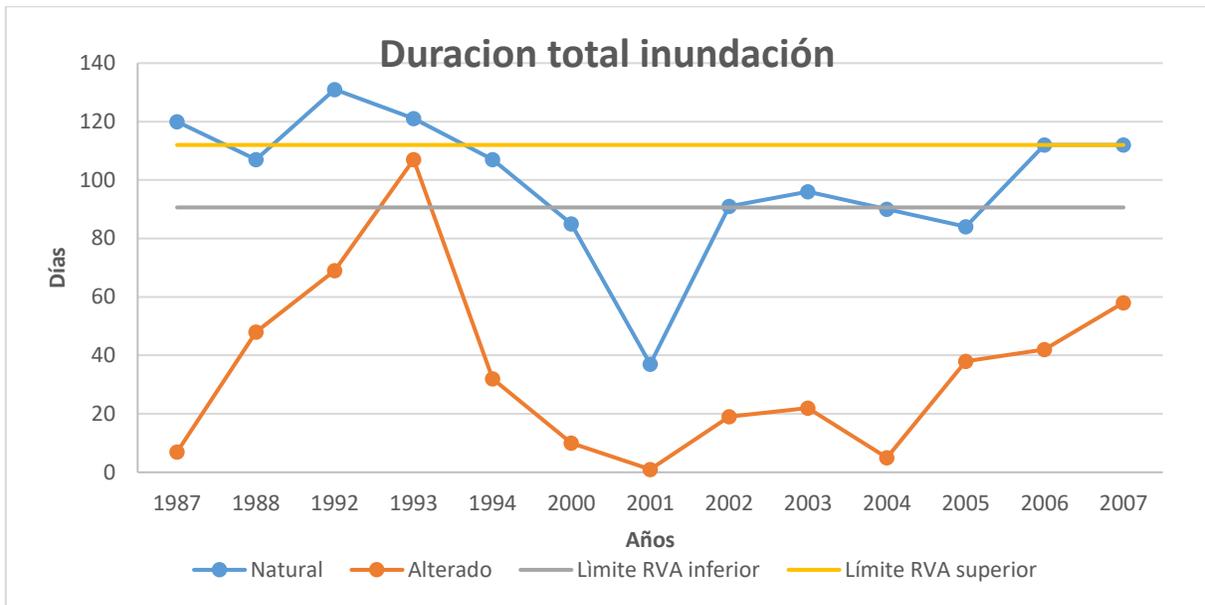


Figura 5.38. Valor del índice duración total de la inundación y limites RVA, para el periodo natural y alterado. En Porto Sao José y para los años en donde se tiene información sobre la producción de peces.

Se puede observar en la *Figura 5.39* que el peak de la inundación total es siempre menor en la serie alterada. También, los años con mayor reclutamiento son los años en los que el peak alterado es mayor. Por lo tanto, se recomienda que este índice se asemeje al natural. Así un régimen hidrológico recomendado, que beneficie la producción de peces, debiese tener su índice “peak total inundación” en la categoría media de los limites RVA. Los tres años con mejor reclutamiento están dentro de los cuatro más cercanos a esta categoría.

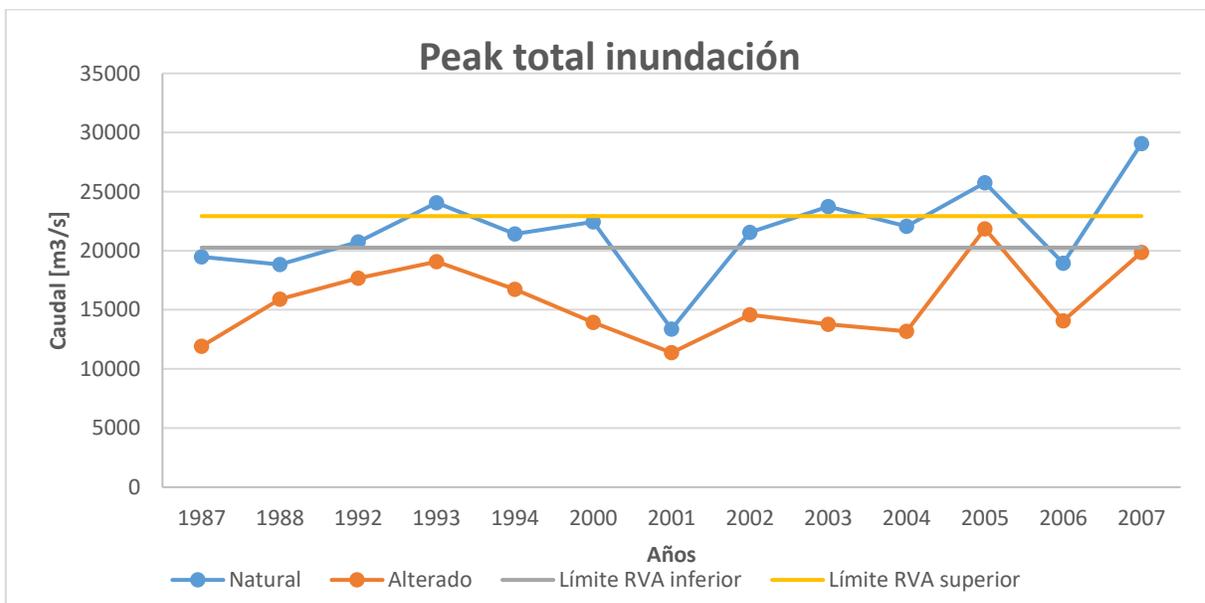
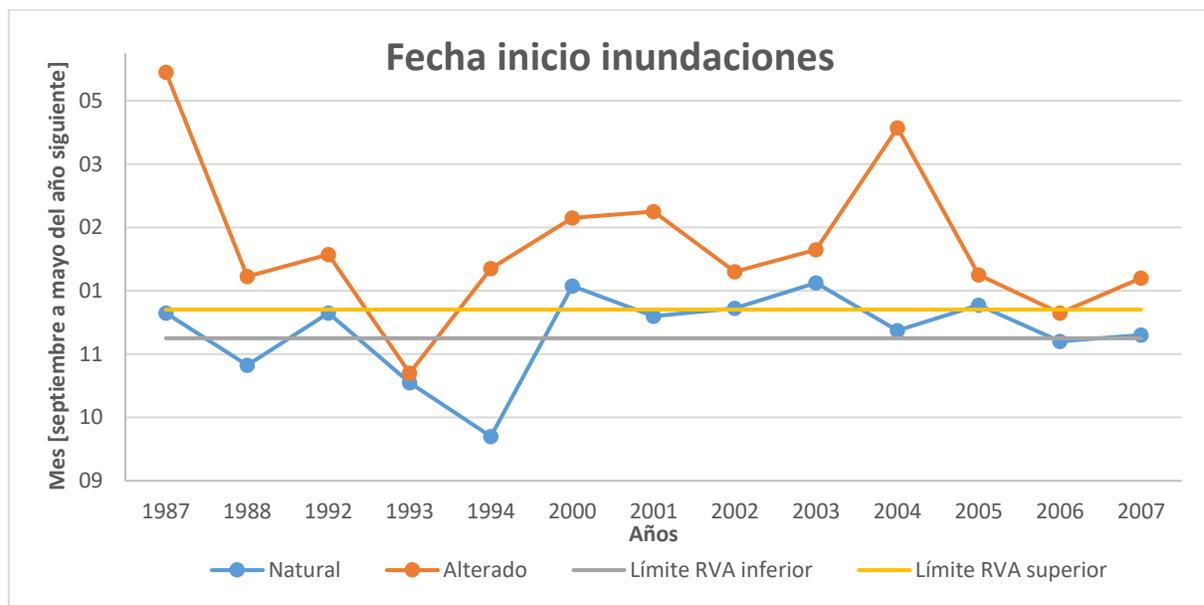


Figura 5.39. Valor del índice peak total de la inundación y limites RVA, para el periodo natural y alterado. En Porto Sao José y para los años en donde se tiene información sobre la producción de peces.

Se puede observar en la *Figura 5.40* que la fecha en la que comienzan las inundaciones es siempre más tardía en la serie alterada. También, los años con mayor reclutamiento son los años en los que el inicio de las inundaciones no sobrepasa el mes de enero. Por lo tanto, se recomienda que este índice se asemeje al natural. Así un régimen hidrológico recomendado, que beneficie la producción de peces, debiese tener su índice “fecha inicio inundaciones” en la categoría media de los límites RVA. Los tres años con mejor reclutamiento están dentro de los ocho más cercanos a esta categoría.



*Figura 5.40.* Valor del índice fecha de inicio de las inundaciones y límites RVA, para el periodo natural y alterado. En Porto Sao José y para los años en donde se tiene información sobre la producción de peces.

En la *Figura 5.41*, a diferencia de los tres índices anteriores, no es posible identificar un patrón inequívoco entre la serie natural y alterada. Podemos apreciar, sin embargo, que el año con mayor reclutamiento, 2007, tiene un solo pulso, al igual que otros dos años, aunque estos no tienen este mismo éxito. Por lo tanto, se puede observar que, es mejor tener menos pulsos, a medida que los tres índices anteriores se mantengan cerca de los de la categoría media natural, o incluso pueden estar un poco más bajos.

Sin embargo, los otros dos años con éxito en el reclutamiento de peces, 1992 y 1993, tienen un número de pulsos más cercano a la categoría media natural. Por lo tanto, se podría adoptar que el índice se ubique dentro de esta categoría, al igual que los otros tres, y mantener de igual manera un buen reclutamiento de juveniles.

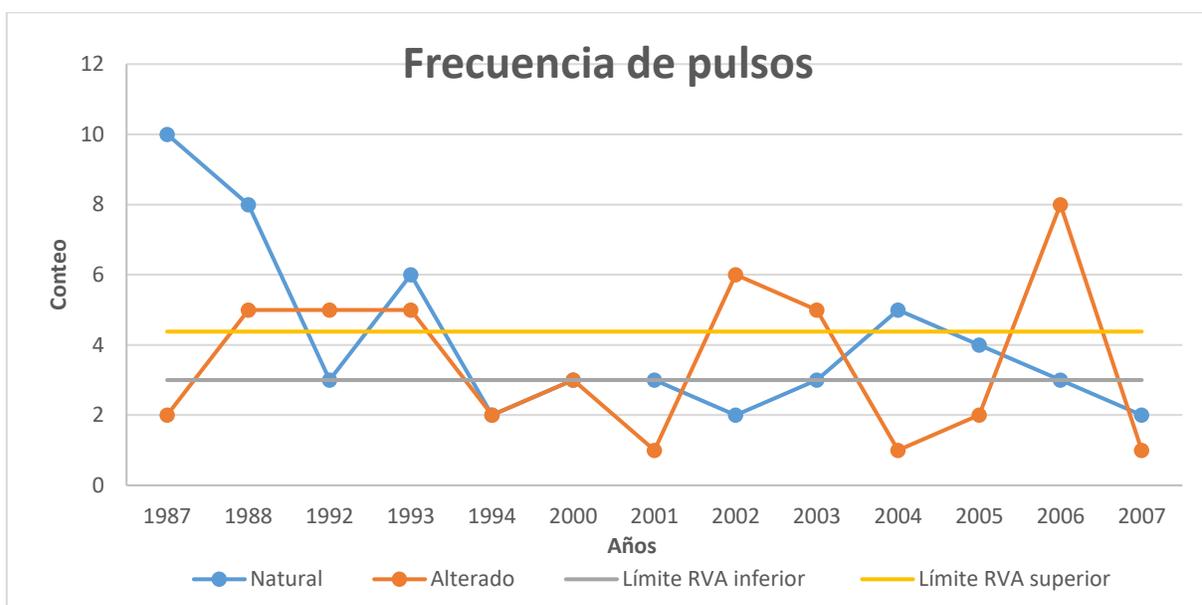


Figura 5.41. Valor del índice frecuencia de pulsos y límites RVA, para el periodo natural y alterado. En Porto Sao José y para los años en donde se tiene información sobre la producción de peces.

A partir del análisis de la frecuencia de pulsos, en las Tablas 5.17 y 5.18 se presenta un quinto indicador, llamado mayor duración ininterrumpida de un pulso, para la serie de caudales naturales y alterados, respectivamente.

Observado la *Figura 5.42* se puede ver que la mayor duración ininterrumpida de un pulso en la serie natural se encuentra sobre los 54 días, excepto en dos años. Sin embargo, en el régimen alterado solo un año supera estos 54 días de inundación ininterrumpida, siendo este el con mayor producción de peces. Por lo tanto, se recomienda que este índice se asemeje al natural. Además, los años con mayor producción de peces, 1992, 1993 y 2007, son tres de los cuatro años con mayor duración de la ininterrumpida de la inundación.

Tabla 5.17 Duración de cada pulso de inundación y el mayor, para cada año en los que se tiene datos sobre la producción de peces, para la serie de caudales naturales en Porto Sao José 1984-2014.

| Duración pulso [días]         | 1987 | 1988 | 1992 | 1993 | 1994 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 |
|-------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Primer pulso                  | 1    | 1    | 6    | 8    | 2    | 15   | 22   | 79   | 53   | 6    | 54   | 27   | 96   |
| Segundo pulso                 | 1    | 18   | 122  | 17   | 105  | 3    | 10   | 12   | 25   | 4    | 4    | 16   | 16   |
| Tercer pulso                  | 25   | 13   | 3    | 4    | -    | 67   | 5    | -    | 24   | 62   | 21   | 69   | -    |
| Cuarto pulso                  | 64   | 54   | -    | 19   | -    | -    | -    | -    | -    | 13   | 5    | -    | -    |
| Quinto pulso                  | 8    | 12   | -    | 43   | -    | -    | -    | -    | -    | 5    | -    | -    | -    |
| Sexto pulso                   | 1    | 2    | -    | 30   | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    |
| Séptimo pulso                 | 12   | 5    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    |
| Octavo pulso                  | 6    | 2    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    |
| Noveno pulso                  | 1    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    |
| Decimo pulso                  | 1    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    |
| Mayor duración ininterrumpida | 64   | 54   | 122  | 43   | 105  | 67   | 22   | 79   | 53   | 62   | 54   | 69   | 96   |

Tabla 5.18 Duración de cada pulso de inundación y el mayor, para cada año en los que se tiene datos sobre la producción de peces, para la serie de caudales alterados en Porto Sao José 1984-2014.

| Duración pulso [días]         | 1987 | 1988 | 1992 | 1993 | 1994 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 |
|-------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Primer pulso                  | 5    | 10   | 29   | 49   | 26   | 1    | 1    | 2    | 4    | 5    | 32   | 1    | 58   |
| Segundo pulso                 | 2    | 7    | 6    | 14   | 6    | 6    | -    | 1    | 2    | -    | 6    | 7    | -    |
| Tercer pulso                  | -    | 7    | 6    | 39   | -    | 3    | -    | 2    | 9    | -    | -    | 1    | -    |
| Cuarto pulso                  | -    | 20   | 9    | 2    | -    | -    | -    | 1    | 6    | -    | -    | 7    | -    |
| Quinto pulso                  | -    | 4    | 19   | 3    | -    | -    | -    | 10   | 1    | -    | -    | 19   | -    |
| Sexto pulso                   | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | 3    | -    | -    | -    | 3    | -    |
| Séptimo pulso                 | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | 2    | -    |
| Octavo pulso                  | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | 2    | -    |
| Mayor duración ininterrumpida | 5    | 20   | 29   | 49   | 26   | 6    | 1    | 10   | 9    | 5    | 32   | 19   | 58   |

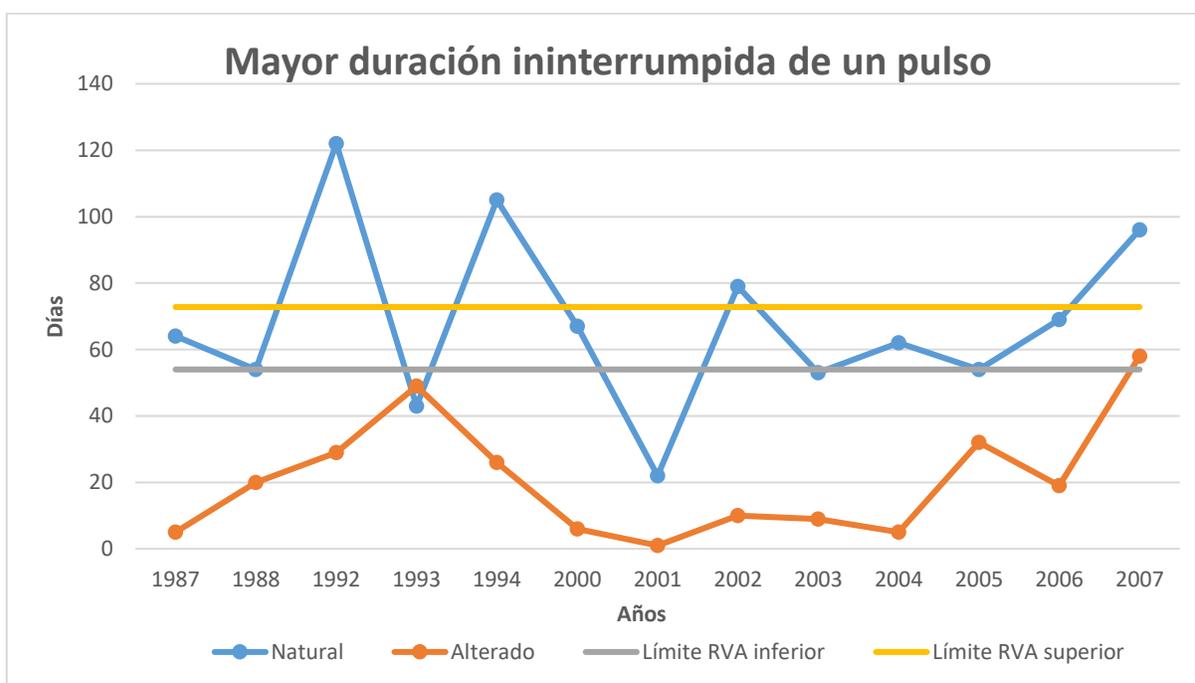


Figura 5.42. Valor del índice mayor duración ininterrumpida de un pulso y límites RVA, para el periodo natural y alterado. En Porto Sao José y para los años en donde se tiene información sobre la producción de peces.

## 6. Análisis de resultados

En el presente capítulo se analizan los resultados presentados en la sección anterior. En primera instancia, se estudian los resultados del análisis preliminar, caracterización de la hidrología y la alteración hidrológica, donde se compara la diferencia en la alteración entre los tres lugares estudiados, Porto Sao José, Rosana y Porto Primavera. Además, se compara la alteración en Porto Sao José para los años 1964-1986 con la de los años 1994-2014, estos períodos representan condiciones diferentes, ya que en el primero no existían aun embalses como el de Porto Primavera y Rosana.

Luego, se discuten los resultados de la identificación y selección de índices que caracterizan el régimen hidrológico, y se relacionan con el servicio ecosistémico de producción de peces. También se discute preliminarmente la recomendación de régimen hidrológico que finalmente favorece la reproducción de especies valiosas para la pesca.

### 6.1.1 Alteración hidrológica

Con respecto al análisis previo y caracterización de la hidrología, se puede ver que Porto Primavera tiene un régimen hidrológico natural parecido a Porto Sao José en magnitud y variabilidad. Por lo tanto, la construcción y operación de embalses genera efectos similares en el régimen hidrológico de ambos lugares.

Lo anterior se debe a que el caudal de Porto Sao José es la suma de los provenientes desde el río Paranapanema, donde se encuentra el embalse Rosana, y Paraná, donde se encuentra el embalse Porto Primavera, sin embargo, la magnitud del caudal proveniente desde el río Paraná es aproximadamente cinco veces la del río Paranapanema. Por lo tanto, en Porto Sao José se mantienen las características del caudal aportante por el río Paraná.

Observando los resultados de la alteración hidrológica, se puede apreciar que efectivamente Porto Sao José y Porto Primavera presentan una alteración bastante parecida, siendo el promedio de la categoría media para todos los índices hidrológicos y para los caudales promedio mensuales en Porto Primavera, entre 1998-2018, alterada un 76% y 71%, respectivamente. En Porto Sao José, entre 1994-2014, es de un 74% y 70%. La diferencia en la alteración puede ser causada por no estudiar las series en los mismos años, o el aporte que genera el caudal del río Paranapanema en Porto Sao José.

Por otro lado, a diferencia de Porto Sao José y Porto Primavera, Rosana no pertenece al río Paraná, sino que, a un afluente que presenta un régimen hidrológico natural de variabilidad y magnitud distinta. Por lo tanto, la construcción y operación de embalses genera también efectos diferentes. Las alteraciones hidrológicas en Rosana no siguen los mismos patrones que los de Porto Sao José y Porto Primavera, ya que no tienen la misma época húmeda ni crecidas. La alteración promedio de la categoría media para los todos índices hidrológicos y para los caudales promedio mensuales en Rosana es de un 49% y 45%, respectivamente.

Finalmente, al estudiar los primeros años de datos disponibles en Porto Sao José 1964-1986, donde aún no se construían varios embalses, como Rosana y Porto Primavera, se

puede notar que la alteración es considerablemente menor que la de los últimos 20 años, siendo 29% y 19% en vez de 74% y 70% en el promedio de todos los índices y caudales promedio mensuales, respectivamente. Es decir, en los últimos 33 años, la alteración ha aumentado más del doble.

### 6.1.2 Recomendación régimen hidrológico

Con respecto al cálculo de los componentes del caudal ecológico para Porto Sao José, se puede apreciar que, al calcularlos con los valores predeterminados por el software utilizado, el valor del caudal de cauce lleno que entrega la literatura para el lugar estudiado no queda como límite para la inundación pequeña, sino que, para los pulsos altos (ver Tabla 5.9). Se puede apreciar que, para los caudales extremadamente bajos, pulsos altos e inundaciones, la mediana de la duración y frecuencia disminuye en la serie alterada (ver Tabla 5.10).

Encontrando en Santos (1991) y Suzuki et al. (2009) el caudal de cauce lleno específico para la zona y que el componente del caudal ecológico que realmente importa para la producción de peces es cuando se rebalsa el cauce (inundación), se define la inundación como el pulso que sobrepasa este límite. Se estudian solo nueve índices que caracterizan este componente y de estos se seleccionan los cuatro con mayor importancia en el reclutamiento de peces juveniles del año según Suzuki et al. (2009) y se calcula uno nuevo a partir del análisis de estos.

Comparando los cinco índices alterados con los naturales, se puede apreciar que el régimen natural tiene mayor duración, mayor peak, comienzo más temprano de la inundación y mayor duración ininterrumpida de la inundación. Con respecto al número de pulsos no hay una tendencia clara, esto se puede apreciar en que, por ejemplo, si se tiene naturalmente una sola inundación, pero con dos peaks, y se disminuye la magnitud (acumulación de agua en el embalse), pueden quedar dos inundaciones más cortas. Sin embargo, si se tienen dos inundaciones, y se disminuye la magnitud, una puede quedar ahora completamente bajo el límite de inundación y, por lo tanto, quedar solo una de ellas. Es decir, el régimen alterado puede generar más pulsos o disminuirlos.

En dos años de los tres con mayor producción de peces, 1992 y 1993 (*Figura 3.2*), el régimen alterado se encuentra cercano a los límites RVA naturales, en el índice número de pulsos, al igual que los otros cuatro. Es decir, para mantener una alta producción de peces, se recomienda generar un régimen hidrológico con el valor de los cinco índices dentro de los límites RVA. Incluso estos se pueden ampliar hasta que los valores alterados de estos dos años queden dentro.

En el año 2007, se tiene una duración de la inundación menor que la de los dos años anteriores, sin embargo, es el año con mayor producción de peces (*Figura 3.2*). Esto se puede deber a que tiene un solo pulso. Es decir, se puede disminuir la duración del pulso si también se genera uno único. La serie natural para el año 2007 tiene naturalmente dos pulsos y en el régimen alterado queda solamente uno, que, a pesar de ser menor al natural, es lo suficientemente largo para lograr una cantidad de peces mayor a todos los demás años medidos. Podemos observar que a los peces los beneficia la cantidad de días ininterrumpidos de inundación.

En síntesis, se recomienda acercar los límites de los cinco índices, duración total inundación, peak total inundación, fecha de inicio inundación, frecuencia de pulsos y mayor duración ininterrumpida de un pulso, dentro de los límites RVA naturales, de manera de generar un estado beneficioso para la existencia de peces nativos y el ecosistema fluvial en general. Sin embargo, existen maneras de generar otro régimen que puede beneficiar de igual manera a los peces, por ejemplo, tener solo una inundación con una duración sobre los 54 días, al contrario del régimen natural que tiene más de un pulso, puede resultar en una alta producción de peces.

## 7. Conclusiones

En el presente trabajo de título se cuantifica la alteración hidrológica que ha generado la construcción y operación de embalses en la parte alta del río Paraná, a través de los índices de alteración hidrológica, IHA, de la serie de caudales naturales y alterados, y el método análisis de rango de variabilidad, RVA. Luego de cuantificar el estado del impacto, se relacionan eventos hidrológicos con la ecología a través de los índices EFC de la serie de caudales naturales y alterados. Posteriormente se seleccionan los índices EFC que más se relacionan con el servicio ecosistémico de producción de peces y, a través del ajuste de estos, se diseña un régimen hidrológico que favorezca este servicio, específicamente el de las especies *Prochilodus lineatus*, *Leporinus obtusidens*, *Pimelodus maculatus*, *Pseudoplatystoma corruscans*, *Pterodoras granulosus* y *Salminus brasiliensis*.

En relación con la cuantificación de la alteración hidrológica producida por la construcción y operación de embalses en la cuenca, se puede concluir que, han generado una notoria alteración, el promedio de la alteración para todos los índices hidrológicos es del 74%, 76%, y 49% y para los caudales promedio mensuales del 70%, 71% y 45% en Porto Sao José, Porto Primavera, y Rosana, respectivamente. También hace 33 años en Porto Sao José, cuando aún no se construían embalses como Porto Primavera y Rosana, el mismo tipo de alteración es del 29% y 19%, respectivamente. Es decir, en los últimos 33 años la alteración en este lugar ha aumentado más del doble. Generando así, una disminución de caudal en los meses húmedos y un aumento en los secos, lo cual claramente afecta la variabilidad natural del río y repercute fuertemente en los ecosistemas fluviales.

Con respecto a la producción de peces, los índices que más se correlacionan, según estudios de biólogos de la zona, son la duración, comienzo, peak y frecuencia de las inundaciones. A partir del análisis de estos, se estudia un quinto índice llamado mayor duración ininterrumpida de un pulso. Se recomienda que estos atributos de la serie hidrológica se acerquen al valor que tendrían en un régimen natural, con un rango de variabilidad RVA, debido a que los peces deseables son nativos de la zona y se comprueba que los años en los que más se acercan los valores a este rango, la producción de peces aumenta.

Sin embargo, para el caso de la frecuencia de inundaciones, el patrón natural no parece ser el más favorable. Los peces prefieren una inundación ininterrumpida en vez de varios pulsos, como se suele tener naturalmente. También este único pulso puede tener una duración menor que la que tendría el sumar el de varios eventos. Tener solo una inundación con una duración sobre los 54 días, al contrario del régimen natural que tiene más de un pulso, puede aumentar la producción de peces, como en el año 2007.

Por lo tanto, dependiendo de cómo afecte a la factibilidad de reoperación de un embalse, se puede adoptar un régimen cercano al natural o generar uno artificial. Si se genera uno artificial aún quedan preguntas por responder, como qué tanto queremos beneficiar la producción de peces nativos, si es suficiente la cantidad de los años 1992 y 1993, o la del 2007 y hasta qué punto esta es sostenible por el ecosistema. El alejarse de las condiciones naturales y generar artificiales que solo benefician a los peces de las

especies mencionadas al comienzo, puede afectar al ecosistema fluvial en general u algunas partes de este.

Este estudio se encuentra enfocado en la producción de peces, donde según otros autores los caudales bajos y extremadamente bajos no tienen gran influencia, sin embargo, estos también se encuentran alterados por los embalses y pueden tener consecuencias ecológicas que deben ser estudiadas.

## 8. Bibliografía

- Agostinho, A. A., Gomes, L. C., & Zalewski, M. (2001). The importance of floodplains for the dynamics of fish communities of the upper river Paraná. *Ecohydrology and Hydrobiology*, 1(1–2), 209–217.
- Agostinho, A. A., Gomes, L. C., Veríssimo, S., & Okada, E. K. (2004). Flood regime, dam regulation and fish in the Upper Paraná River: Effects on assemblage attributes, reproduction and recruitment. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 14(1), 11–19.
- Agostinho, A. A., Pelicice, F. M., & Gomes, L. C. (2008). Dams and the fish fauna of the Neotropical region: Impacts and management related to diversity and fisheries. *Brazilian Journal of Biology*, 68(4 SUPPL.), 1119–1132.
- Agostinho, A.A., Thomaz, S.M., Minte-Vera, C.V. and Winemiller, K.O. (2000). Biodiversity in the high Parana River floodplain. In: Gopal, B., Junk, W.J. and Davis, J.A. (eds.), Biodiversity in Wetlands: Assessment, Function and Conservation, Vol I. *Backhuys Publishers*, Leiden, The Netherlands, pp. 89–118.
- Agostinho, Angelo A., Thomaz, S. M., & Gomes, L. C. (2005). Conservation of the biodiversity of Brazil's inland waters. *Conservation Biology*, 19(3), 646–652.
- Bailly, D., Agostinho, AA. Suziki, HI. (2008). Influence of the flood regime on the reproduction of fish species with different reproductive strategies in the Cuiaba river, upper Pantanal, Brazil. *River Research and Applications*, 24(9), 1218-1229.
- Casco, S., Neiff, M., & Neiff, J. (2005). Biodiversidad en ríos del litoral fluvial. Utilidad del software PULSO. *Miscelánea*, 14(3400), 105–120.
- Casco, Sylvia. (2003). Distribución de la vegetación fluvial y su relación con el régimen de pulsos en el Bajo Paraná. 125–130.
- Gao, B., Li, J., & Wang, X. (2018). Analyzing changes in the flow regime of the Yangtze River using the eco-flow metrics and IHA metrics. *Water (Switzerland)*, 10(11).
- Gao, B., Yang, D., Zhao, T., & Yang, H. (2012). Changes in the eco-flow metrics of the Upper Yangtze River from 1961 to 2008. *Journal of Hydrology*, 448–449, 30–38.
- Gao, Y., Vogel, R. M., Kroll, C. N., Poff, N. L. R., & Olden, J. D. (2009). Development of representative indicators of hydrologic alteration. *Journal of Hydrology*, 374(1–2), 136–147.
- Granzotti, R. V., Miranda, L. E., Agostinho, A. A., & Gomes, L. C. (2018). Downstream impacts of dams: shifts in benthic invertivorous fish assemblages. *Aquatic Sciences*, 80(3).

- Jarduli, L. R., Garcia, D. A. Z., Vidotto-Magnoni, A. P., Casimiro, A. C. R., Vianna, N. C., de Almeida, F. S., ... Orsi, M. L. (2019). Fish fauna from the paranapanema river basin, Brazil. *Biota Neotropica*, 20(1), 1–19.
- Jowett, I. G. (1997). Instream flow methods: A comparison of approaches. *Regulated Rivers: Research and Management*, 13(2), 115–127.
- Marques, G. F., & Tilmant, A. (2018). Cost distribution of environmental flow demands in a large-scale multireservoir system. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 144(6), 1–11.
- Marques, H., Dias, J. H. P., Perbiche-Neves, G., Kashiwaqui, E. A. L., & Ramos, I. P. (2018). Importance of dam-free tributaries for conserving fish biodiversity in Neotropical reservoirs. *Biological Conservation*, 224(March 2017), 347–354.
- Mathews, R., & Richter, B. D. (2007). Application of the indicators of hydrologic alteration software in environmental flow setting. *Journal of the American Water Resources Association*, 43(6), 1400–1413.
- Millennium Ecosystem Assessment, MEA. (2005). Ecosystems and human well-being, Millennium Ecosystem Assessment. Key Questions in the Millennium Ecosystem Assessment.
- Nascimento do Vasco, A., de Oliveira Aguiar Netto, A., & Gonzaga da Silva, M. (2019). The influence of dams on ecohydrological conditions in the São Francisco River Basin, Brazil. *Ecohydrology and Hydrobiology*.
- Neiff, J.J. (2001). Diversity in some tropical wetland systems of South America. In: Gopal, B., Junk, W.J. and Davis, J.A. (eds.), *Biodiversity in Wetlands: Assessment, Function and Conservation*, Vol II. Backhuys Publish., The Netherlands, pp 157-186.
- Okada, E. K., Agostinho, A. A., & Gomes, L. C. (2005). Spatial and temporal gradients in artisanal fisheries of a large Neotropical reservoir, the Itaipu Reservoir, Brazil. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 62(3), 714–724.
- Okawa C. ( 2009). Em busca do hidrograma ecológico para a planície de inundação do alto rio Paraná: considerações iniciais. Universidade estadual de maringá centro de ciências biológicas departamento de biologia programa de pós-graduação em ecologia de ambientes aquáticos continentais.
- Olden, J. D., & Poff, N. L. (2003). Redundancy and the choice of hydrologic indices for characterizing streamflow regimes. *River Research and Applications*, 19(2), 101–121.
- Pelicice, F. M., & Agostinho, A. A. (2008). Fish-passage facilities as ecological traps in large neotropical rivers. *Conservation Biology*, 22(1), 180–188.
- Pereira, L. S., Demétrio, J. A., Cunico, A. M., Latini, J. D., Gomes, L. C., & Agostinho, A. A. (2019). Cage aquaculture in Neotropical waters promotes attraction and aggregation of fish. *Aquaculture Research*, 50(10), 2896–2906.

Poff N.L., 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.

Richter D., Baumgartner V., Powell J., Braun P. (1996). A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems. *Conservation biology*. 10(4), 1163-1174.

Richter D., Baumgartner V., Wigington R., Braun P. (1997). How much water does a river need?. *Freshwater Biology*, 37, 231–249.

Santos, M.L. (1991). *Faciologia e evolução de barras de canal do rio Paraná na região de Porto Rico-PR*. Dissertação (Mestrado) - IGCE/UNESP. Rio Claro/SP. Inédito.

Stewardson, M. J., & Gippel, C. J. (2003). Incorporating flow variability into environmental flow regimes using the flow events method. *River Research and Applications*, 19(5–6), 459–472.

Suzuki, H. I., Agostinho, A. A., Júlio-Junior, & Gomes, L. C. (2009). Inter-annual variations in the abundance of young-of-the-year of migratory fishes in the Upper Paraná River floodplain: relations with hydrographic attributes. In *Braz. J. Biol* (Vol. 69).

Tharme, R. E. (2003). A global perspective on environmental flow assessment: Emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers. *River Research and Applications*, 19(5–6), 397–441.

The Economics of Ecosystems and Biodiversity, TEEB. (2010). Integrating the ecological and economic dimensions in biodiversity and ecosystem service valuation. *The Economics of Ecosystems and Biodiversity: The Ecological and Economic Foundations*. Chapter 1.

The Nature Conservancy. (2011). *Manual del usuario. Indicadores de alteración hidrológica*. Version 7.1, Pag. 8.

Vogel, R. M., Sieber, J., Archfield, S. A., Smith, M. P., Apse, C. D., & Huber-Lee, A. (2007). Relations among storage, yield, and instream flow. *Water Resources Research*, 43(5), 1–12.

Wang, Y., Wang, D., Lewis, Q. W., Wu, J., & Huang, F. (2017). A framework to assess the cumulative impacts of dams on hydrological regime: A case study of the Yangtze River. *Hydrological Processes*, 31(17), 3045–3055.

Yang, Y. C. E., Cai, X., & Herricks, E. E. (2008). Identification of hydrologic indicators related to fish diversity and abundance: A data mining approach for fish community analysis. *Water Resources Research*, 44(4), 1–14.