

UNIVERSIDAD ADOLFO IBÁÑEZ

TESIS DE MAGÍSTER

Impacto del cambio climático sobre el dimensionamiento de embalses

Autor:

Tomás Rammsy Serón

Profesor guía:

Cristián Chadwick Irrarrázaval

Profesor Co-Guía:

Jorge Gironás León

*Tesis realizada acorde a los requerimientos para el grado de Magíster en Ciencias de la
Ingeniería y para el título de Ingeniero Civil de la*

Facultad de Ingeniería y Ciencias

Noviembre 2024



ÍNDICE

1.	<i>INTRODUCCIÓN</i>	3
2.	<i>PROBLEMA U OPORTUNIDAD</i>	6
3.	<i>ESTADO DEL ARTE</i>	9
4.	<i>HIPÓTESIS, OBJETIVO GENERAL Y OBJETIVOS ESPECÍFICOS DE TRABAJO</i>	12
5.	<i>METODOLOGÍA</i>	13
5.1.	Dimensionamiento de embalses:.....	13
5.2.	Generación de Series de Tiempo Sintéticas:.....	14
5.3.	Detección de Cambios Significativos en el Dimensionamiento de Embalses:.....	18
6.	<i>RESULTADOS Y ANÁLISIS</i>	19
6.1.	Escenario con demanda constante:	19
6.1.1.	Cambio en la media del caudal de entrada:	24
6.1.2.	Cambio en la desviación estándar del caudal de entrada:	25
6.1.3.	Cambio en la media y desviación estándar del caudal de entrada:.....	26
6.2.	Escenario con demanda variable:.....	28
6.2.1.	Cambio en la media del caudal de entrada:	33
6.2.2.	Cambio en la desviación estándar del caudal de entrada:	34
6.2.3.	Cambio en la media y desviación estándar del caudal de entrada:.....	35
7.	<i>CONCLUSIÓN Y DISCUSIÓN</i>	37
8.	<i>BIBLIOGRAFÍA</i>	40
9.	<i>ANEXOS</i>	49
	Anexo A.....	49
	Anexo B.....	51
	Anexo C.....	54
	Anexo D.....	56
	Anexo E	59
	Anexo F	61

1. INTRODUCCIÓN

Los recursos hídricos son sumamente importantes para la vida en la Tierra, sin ellos los ecosistemas no podrían desarrollarse (Shiklomanov, 1991). No solo son importantes para la naturaleza, sino que también juegan un papel importante en diversas actividades humanas (Ríos et al, 2021). El desarrollo agrícola depende en gran medida de tener suficientes recursos hídricos para los cultivos (Dey and Mishra, 2017). Otras actividades humanas que requieren de los recursos hídricos son: el sector sanitario, tanto para la producción y abastecimiento de agua potable, como la eliminación de aguas residuales (Iglesias et al, 2005). Además, el agua es fundamental para diversas actividades industriales (Geist, 2021) y la generación de energía hidroeléctrica. Sin embargo, el tener suficiente acceso a los recursos hídricos altamente variables en el tiempo y espacio es un permanente desafío, agravado por factores como el crecimiento de la población y la sobreexplotación de los acuíferos (UN Water, 2020). Un factor adicional de relevancia que afecta la disponibilidad de agua es el cambio climático.

Los cambios recientes del clima, se deben al menos en parte al cambio climático (Gonzalez et al, 2023). El cambio climático está definido como el cambio del estado del clima identificable en la variación de sus propiedades, persistente durante periodos de tiempo largo (Bernstein et al, 2007). En otras palabras, una modificación sobre el ciclo hidrológico, generado por aumentos de la temperatura o cambios en las precipitaciones, con sus respectivas consecuencias sobre los recursos hídricos, se deben tanto al cambio climático como a la variabilidad climática (Razavi, 2012). El cambio climático alterará el ciclo del agua, dada su conexión con fenómenos atmosféricos (Allan et al, 2020). El aumento de la temperatura conlleva un incremento de la evaporación, que está relacionada con la mayor capacidad de traslado del agua por la atmósfera, generando sequía en algunas zonas o precipitaciones extremas en otras (Baeza, 2017). Los aumentos de la temperatura también generan un derretimiento temprano de la nieve, afectando la disponibilidad del recurso hídrico en zonas dependientes de caudales nivales para las temporadas secas (Vicuña et al, 2012). Combatir el cambio climático requiere esfuerzos tanto de mitigación, como de adaptación (Abbass et al, 2022). La mitigación son acciones que disminuyen las causas del cambio climático, es decir, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (Fawzy et al, 2020; Seyboth, 2013), existen dos estrategias principales para mitigar las emisiones de CO₂: reducir las emisiones directas o aumentar los sumideros de CO₂ (Huang et al., 2020). La adaptación al cambio climático va asociada a cambios que permiten adecuarse a las nuevas condiciones climáticas.

El aumento de las temperaturas, junto con los cambios en los patrones de precipitación, genera modificaciones en el ciclo hidrológico y aumenta la incertidumbre sobre los caudales de los ríos (Bianucci, 2013), lo que a su vez afecta el almacenamiento de agua terrestre, elemento clave para la disponibilidad de recursos hídricos (Pokhrel et al., 2021). Estas alteraciones derivadas del cambio climático generan una hidrología no estacionaria (Mianabadi, 2020), caracterizada por variaciones significativas en el tiempo. Esto implica que tanto los almacenamientos de agua naturales como artificiales sufrirán alteraciones, ya que la cantidad esperada de agua año a año se verá afectada (Casado y Gil, 2006). En este contexto, la gestión eficiente de los recursos hídricos adquiere una relevancia crucial como estrategia de adaptación al cambio climático (Raje y Mujumdar, 2010). Una de las herramientas fundamentales dentro de esta gestión es la correcta evaluación y construcción de embalses.

Los embalses se definen como estructuras construidas para atravesar un cauce natural o artificial, produciendo un aumento en el nivel del agua y modificando la distribución de caudales (Sandoval, 2018). Su función principal es la gestión de los recursos hídricos, ayudando a mitigar los impactos de sequías e inundaciones, especialmente relevantes ante el aumento de eventos extremos debido al cambio climático (Gómez, 2009). En periodos de sequía, los embalses almacenan agua para distribuirla durante la escasez de precipitaciones (Armengol et al, 2009), mientras que en épocas de lluvias extremas, contribuyen a prevenir inundaciones almacenando el exceso de agua (Eichert y Davis, 1976). Además, los embalses se construyen por razones como el tratamiento del agua mediante la decantación de sedimentos (Baeza, 2017), el almacenamiento y distribución para el consumo humano a lo largo del tiempo (Cifuentes et al, 2013) y la generación hidroeléctrica (CEPAL, 2012).

La implementación de embalses requiere de un conjunto de enfoques y acciones tanto en la operación, con objeto de gestionar en el tiempo la entrega de agua, como en el diseño y dimensionamiento de estos (Loucks and Van Beek, 2017). La correcta operación de los embalses, es de suma importancia para hacer frente a escenarios de inundaciones o sequías, ya que para satisfacer la demanda para la cual fueron diseñados se requiere de estrategias efectivas que distribuyan adecuadamente el agua (Loucks and Van Beek, 2017). Para conseguir estos objetivos es necesario una correcta medición de variables hidrometeorológicas (e.g., niveles embalsados, caudales de entrada y salida, variables climáticas) que permitan tomar decisiones informadas (Velasco et al, 2005). Un ejemplo de decisiones de operación es el *Hedging*, que consiste en no satisfacer totalmente la demanda actual de agua, reduciendo el riesgo de escasez severa en el futuro

(You and Cai, 2008). Se ha podido determinar que el *Hedging* óptimo busca determinar el momento exacto en que se debe reducir el suministro de agua, para lograr un balance entre satisfacer la demanda actual y preservar el recursos para el futuro (Draper and Lund, 2004).

Por otra parte, el dimensionamiento de embalses requiere tener en cuenta diversos factores al momento de la toma de decisión (Cifuentes et al, 2013), con objeto de lograr un correcto funcionamiento a futuro. Los factores principales que se deben considerar son la variabilidad climática (González et al, 2007), y la demanda de agua (Patskoski and Sankarasubramanian, 2015). En particular, la variabilidad climática impacta el deshielo en las zonas de alta montaña, la cantidad de precipitaciones, los caudales que abastecen a los embalses, la temperatura, además de otros factores climáticos que controlan la evaporación del agua presente en la cuenca y las aguas embalsadas.

El dimensionamiento de embalses se basa en realizar un balance simplificado considerando los flujos de entrada y salida; además de los almacenamientos en el embalse que consideren los factores como la temperatura y la cantidad de precipitaciones (Sandoval, 2018). Para realizar este balance simplificado se utiliza el método del diagrama de Rippl o el método de la sucesión de *peaks* (Skertchly, 1989), los cuales permiten comparar los caudales que alimentarán los embalses, contra la demanda que deben satisfacer mediante la gráfica del volumen acumulado de entrada versus el tiempo. Con todo lo anterior se puede determinar la capacidad ideal para que el embalse pueda cumplir sus objetivos de forma adecuada (Peralta and Tapia, 2019). Hasta donde sabemos, en la actualidad no hay estudios que analicen cómo dimensionar embalses bajo escenarios de cambio climático.

2. PROBLEMA U OPORTUNIDAD

Históricamente, en el diseño hidrológico, el dimensionamiento de embalses suele asumir el supuesto de hidrología estacionaria (Poveda and Álvarez, 2012). Sin embargo, el supuesto de estacionariedad ha dejado de ser válido debido a los efectos del cambio y la variabilidad climática (Schlef et al, 2022). Se ha evidenciado un cambio en el comportamiento del clima, como lo es el aumento de temperatura a nivel global, lo que conlleva cambios sobre las precipitaciones, con aumentos de estas en algunas zonas y disminuciones en otras (Chou and Neelin, 2004). En otras palabras, los métodos que asumen estacionariedad hidrológica para el dimensionamiento de embalses, quedan obsoletos, dado que la cantidad de agua que ingresará a los embalses en forma de caudales será distinta a la que ha pasado por los ríos históricamente.

Pepin y Seidel (2005) muestran como el calentamiento de la superficie ha estado presente en la mayoría de las zonas continentales del mundo. En dicho estudio, se ha observado un aumento de temperatura sobre los océanos, en el Atlántico norte, gran parte del océano Índico y el Pacífico occidental y subtropical. Sin embargo, a dicha fecha se evidenciaba una disminución en la temperatura de la superficie del mar en la mayoría del Pacífico ecuatorial oriental (Falvey y Garreaud, 2009). El estudio de Roxy et al. (2019) menciona que esta tendencia sobre el calentamiento en los trópicos, provocaría un cambio en los patrones de circulación de los vientos en las latitudes más altas (entre 66° y 90°) del hemisferio sur, con el punto de inflexión cercano a los 40° latitud sur. Del mismo modo, se proyecta un aumento de las precipitaciones en algunas regiones ubicadas en las latitudes altas (Ártico y la Antártida) y una disminución de estas en otras regiones ubicadas en algunas áreas tropicales (Martinez and Neelin, 2023).

Los cambios en temperaturas, precipitaciones y patrones de circulación general, tendrán diversos impactos sobre la hidrología. En particular, en el estudio de Pokhrel et al. (2021) realizan proyecciones sobre el almacenamiento de agua terrestre para mediados y finales del siglo XXI. Las proyecciones de almacenamiento de agua indican que se espera una significativa disminución en el almacenamiento de agua terrestre en gran parte del hemisferio sur, Europa, el Mediterráneo y los Estados Unidos, mientras que se prevé un aumento en el este de África, Asia meridional y las altas latitudes del norte. En dicho estudio, se muestra como a nivel global, se prevé una disminución del almacenamiento de agua terrestre en aproximadamente dos tercios de su área actual, excluyendo las regiones polares y los glaciares, para finales del siglo XXI. Sin embargo, no todo el planeta tendrá el mismo comportamiento. En algunas regiones del norte de los Estados Unidos (región de los

grandes lagos), se espera una disminución inicial del almacenamiento de agua terrestre seguida de un ligero aumento, debido a que se proyecta un aumento de la precipitación. En particular gestionar las aguas es un gran desafío en las zonas donde las precipitaciones se concentran en un tiempo corto, seguido de largos periodos sin precipitaciones (Konapala et al, 2020).

En el estudio de Chadwick et al. (2023), se llevó a cabo una investigación en las cuencas de Limarí, Maipo, Maule y Valdivia para entender cómo se comportan diferentes métodos de corrección de sesgo al minuto de estudiar proyecciones climáticas. En relación a las precipitaciones anuales, se espera una marcada reducción, con disminuciones promedio del orden del 24% en la cuenca del Limarí, 28% en la cuenca del Maipo, 29% en la cuenca del Maule y 55% en la cuenca de Valdivia (Araya-Osses et al, 2020). En Chadwick et al., (2018), a partir de Modelos Climáticos Globales (GCMs), bajo el escenario RCP 8.5, se proyecta un incremento promedio de la temperatura en las cuencas del Limarí, Maipo y Maule de aproximadamente 4,2°C, 3,8°C y 3,6°C, respectivamente. Además, se proyecta que la cuenca de Valdivia experimentará inviernos más cálidos y secos hacia finales del siglo (2081-2100). Estas proyecciones concuerdan con investigaciones previas que se basaron en modelos climáticos del CMIP3 bajo el escenario A2 (Garreaud, 2011).

En consecuencia, estos cambios afectarán de manera significativa la disponibilidad de agua y los regímenes hidrológicos de las cuencas. Uno de los principales impactos será la alteración en el proceso normal de deshielo de la nieve en la cordillera, lo cual afectará los patrones habituales de recolección y los niveles máximos de los caudales que alimentan los embalses (Yañez, 2022). Estos cambios presentan desafíos adicionales para la gestión de los recursos hídricos y exigen una planificación más cuidadosa de las infraestructuras en las áreas afectadas.

La sequía es uno de los escenarios más preocupantes para la gestión del agua. Se caracteriza por una severa escasez de agua en comparación con los valores normales, extendiéndose a lo largo de un periodo de tiempo significativo (Fernández y Gironás, 2017). El cambio climático aumenta la probabilidad de que se presenten megasequías en regiones como Chile y sus alrededores, ya que las temperaturas en aumento y los cambios en los patrones de precipitación generan condiciones más secas en estas áreas específicas (Garreaud et al, 2017). Este fenómeno plantea un desafío global, ya que afecta a países que enfrentan un aumento en la demanda y una disminución en la capacidad de almacenar agua debido al déficit de precipitaciones (Ortega, 2013).

Las proyecciones del Cuarto Informe del IPCC indican un desplazamiento de las zonas secas subtropicales, con un clima árido o semiárido, hacia las regiones polares en el futuro (IPCC, 2007). Es crucial comprender que la megasequía es un evento de gran relevancia por sí mismo y en algunas regiones del planeta, como por ejemplo Chile, su probabilidad de ocurrencia se acentúa debido al cambio climático. Un ejemplo de esto es el suroeste de Estados Unidos, en el cual se proyecta un proceso continuo de sequedad en esa región hasta finales del siglo XXI (Cook et al, 2010).

En Chile, Fernández y Gironás (2021) señalan que la megasequía, que afectó a la zona central desde 2010 con impactos al menos hasta el 2022, ha sido identificada como un evento sin precedentes en el registro histórico y poco común en tiempos recientes, generando impactos significativos en la hidrología. Además, el estudio de Fernández y Gironás (2021) destaca que a pesar de no haber alcanzado la intensidad de las sequías del siglo XX, la megasequía ha acumulado una serie de años con precipitaciones por debajo de lo normal y sin períodos húmedos intermedios, lo que ha generado un impacto significativo en todo el territorio.

Si bien las sequías impulsan el desarrollo de tecnologías en hidrología, también provocan un aumento de la incertidumbre, especialmente en zonas donde se espera una disminución de las precipitaciones, como en las zonas centro y sur de Chile. Las regiones que están bajo sequía enfrentarán una mayor necesidad de capacidad de almacenamiento de agua, pero al mismo tiempo, tendrán una menor disponibilidad de agua para almacenar.

Las incertidumbres deben abordarse para garantizar una planificación efectiva y sostenible de los recursos hídricos (Herman et al, 2020), Estas influyen en las decisiones relacionadas con la cantidad, diseño y operación de infraestructura de almacenamiento (Campos, 2020).

El dimensionamiento de embalses se vuelve un gran desafío, ya que se está observando un cambio en la estacionaridad sobre el clima en general durante los últimos años (Schlef et al, 2022). En consecuencia, en aquellas zonas donde las precipitaciones aumenten o disminuyan, no está claro si la dimensión óptima de los embalses debiese ser mayor, menor o igual, dado que existirá una alteración en los patrones de precipitaciones y caudales que genera incertidumbres sobre el correcto dimensionamiento de los embalses.

3. ESTADO DEL ARTE

El dimensionar embalses bajo escenarios de variabilidad y cambio climático, es un desafío que no necesariamente está bien abordado con los métodos tradicionales (Soundharajan et al, 2016). La aceleración del fenómeno del cambio climático hace que el supuesto de estacionariedad deje de ser válido (Milly et al, 2015), lo cual tiene efectos directos en los flujos de entrada a los embalses (Schlef et al, 2022). Estos cambios en los patrones climáticos, según lo señalado por Bianucci (2013), están impactando significativamente el ciclo hidrológico y la disponibilidad de agua, lo que representa un desafío para la gestión sostenible de los embalses. Por otro lado, la creciente demanda de agua para satisfacer las diversas necesidades de la población está generando un mayor estrés sobre los embalses (UN Water, 2020). Debido a estos cambios sobre el ciclo hidrológico, no queda claro si los métodos para el dimensionamiento de embalses, son los más adecuados (Monier and Gao, 2015).

Para que los embalses cumplan con su funcionamiento, deben almacenar suficiente agua que permita suministrar la demanda futura (Campos, 2020). Con esto se busca resolver el problema de variabilidad temporal de la disponibilidad del recurso hídrico y abastecer de agua en períodos que no está disponible naturalmente. Para el correcto funcionamiento de un embalse, se requiere que estos tengan las dimensiones adecuadas (Peralta and Tapia, 2019). El dimensionamiento de embalses bajo un escenario estacionario se puede resolver con distintos métodos como lo son: el método del diagrama de Rippl, algoritmo de la sucesión de *peaks* o simulación de embalses (Skertchly, 1989; Loucks and Van Beek, 2017).

El método de diagrama de Rippl o curva de masa muestra el gráfico del escurrimiento acumulado versus el tiempo. Para aplicarlo, se utilizan datos de escurrimientos mensuales correspondientes a varios años para determinar la capacidad que necesitará el embalse para aprovechar el máximo caudal del río (Satriani et al, 2021). Este método indica claramente cuándo el embalse está lleno, vacío o vertiendo agua.

El método de algoritmo de la sucesión de *peaks*, es una técnica utilizada en hidrología para analizar y modelar eventos extremos de inundaciones en una zona específica. Este método se enfoca en recopilar registros históricos de los caudales máximos experimentados por un río o arroyo durante un período de tiempo definido. Estos puntos de datos de caudal máximo se organizan en orden descendente para identificar los incidentes de inundación más extremos. A continuación, se examina la frecuencia de ocurrencia de los caudales máximos, lo que permite estimar la probabilidad de que se produzcan inundaciones de cierta intensidad y su período de retorno o recurrencia asociado. Utilizando esta información, se pueden emplear técnicas estadísticas para modelar las relaciones entre máximos de caudal de diferentes intensidades. Este análisis permite el diseño de ingeniería de infraestructuras hidráulicas como presas, garantizando su resiliencia frente a las posibles condiciones de inundaciones.

El método de simulación de embalses emplea modelos matemáticos y herramientas de simulación computacional para generar escenarios hidrológicos y evaluar el desempeño del embalse en diferentes condiciones (Saab et al., 2022). Este método se basa en simular la operación del embalse, considerando la ecuación de continuidad y la restricción de volumen máximo y mínimo. Además, considera variables como la evaporación neta y otras pérdidas en el tiempo. La principal diferencia entre el método de Rippl y el método de simulación de embalses es que el primero se centra en la capacidad de almacenamiento necesaria y en el comportamiento del embalse ante flujos de entrada y entrega de agua, mientras que el segundo considera una simulación de la operación con una variedad de variables, como evaporación neta, volumen almacenado inicial y otras pérdidas, para proporcionar estimaciones más detalladas y precisas del desempeño de dicha operación.

Los métodos recién mencionados funcionan muy bien bajo un escenario estacionario porque utilizan los datos de los caudales máximos, caudales mínimos y el agua que ingresa en promedio, asumiendo que las estadísticas del pasado se debiesen repetir hacia el futuro. Sin embargo, con los cambios en los patrones de precipitaciones y el aumento de la temperatura global, estos métodos podrían dejar de funcionar adecuadamente dado que los caudales futuros no serán los mismos que los históricos (Yañez, 2022). Por lo tanto, hace falta estudios que analicen el dimensionamiento de embalses bajo condiciones de variabilidad y cambio climático.

En el contexto de un nuevo escenario global caracterizado por el cambio climático y sus efectos en el ciclo hidrológico, resulta preocupante la baja importancia que se le otorga al considerar los cambios hidrológicos sobre el dimensionamiento de infraestructuras, como los embalses (Marton and Paseka, 2017). Como se ha mencionado, el aumento progresivo de la temperatura a nivel global y los cambios en los patrones de precipitación pueden tener impactos significativos en la disponibilidad y distribución del recurso hídrico en distintas regiones del mundo (Beguería et al, 2022). Sin embargo, al planificar y diseñar embalses, es común que se subestime la relevancia de estos cambios en el clima (Marton et al, 2014), lo que puede llevar a infraestructuras mal dimensionadas y menos preparadas para enfrentar los desafíos futuros de alcanzar una gestión sostenible del agua (Poff et al, 2016). Es fundamental reconocer y abordar adecuadamente este nuevo contexto global al dimensionar embalses, para asegurar que estas infraestructuras consideren desde su diseño las condiciones cambiantes del clima y garantizar un uso eficiente del recurso hídrico.

Una de las novedades al momento de calcular el dimensionamiento es la utilización del método de simulación (Turner et al, 2020). Estos métodos simulan un balance hídrico bajo diferentes escenarios, analizando variables como el volumen de almacenamiento, los caudales de entrada y salida, y la capacidad de satisfacer la demanda. Esto es clave para la planificación y gestión de los recursos hídricos en un contexto de cambio climático (Beven and Binley, 1992). Estas simulaciones permiten obtener una mejor estimación del impacto que tendrán los embalses en el futuro y tomar decisiones informadas sobre su diseño y capacidad de almacenamiento. Sin embargo, a pesar que se ha demostrado que el método de simulación es una herramienta efectiva para abordar la variabilidad y el cambio climático en el dimensionamiento de embalses mediante la generación de múltiples escenarios climáticos (Turner et al, 2020), este método es usado para analizar la operación de los embalses, más que analizar el dimensionamiento de estos.

4. HIPÓTESIS, OBJETIVO GENERAL Y OBJETIVOS ESPECÍFICOS DE TRABAJO

Hipótesis: El dimensionamiento de embalses bajo escenarios de disminución de precipitaciones debido al cambio climático, debiese entregar embalses de menor tamaño.

Objetivo general: Analizar el dimensionamiento de embalses bajo escenarios de cambio climático, en miras de entender cuando se hace necesario analizar la no estacionaridad y si el dimensionamiento de embalses genera embalses de mayor o menor tamaño en un clima cambiante.

Objetivos específicos:

- Analizar el impacto de la variabilidad natural en el dimensionamiento de embalses.
- Analizar el impacto de la variabilidad y el cambio climático sobre el dimensionamiento de embalses y como se compara esto contra un escenario tradicional.
- Analizar desde cuando debiese ser relevante el considerar el cambio climático en el dimensionamiento de embalses.

5. METODOLOGÍA

Para garantizar un funcionamiento adecuado de los embalses frente a escenarios de variabilidad y cambio climático, estos deben dimensionarse correctamente para cumplir su rol de almacenar y regular el flujo hídrico. En este trabajo se analizará el dimensionamiento de los embalses mediante distintos escenarios que presentarán variaciones tanto en la oferta como la demanda de agua. Primero, se abordará el dimensionamiento de los embalses mediante el método de Rippl teniendo en cuenta las características hidrológicas. Para simular las condiciones futuras del clima, caudales y la demanda, se generarán series sintéticas de caudales de entrada que incluyen escenarios con cambios tanto en la desviación estándar, como en la media. Finalmente, se analiza cambios en la demanda y sobre cada uno de estos escenarios se analiza la temporalidad o el cuándo se verán cambios significativos en el tiempo. Este enfoque ayudará a comprender mejor cómo el cambio climático afecta la planificación de embalses y la gestión del agua.

5.1. Dimensionamiento de embalses:

En el proceso de dimensionamiento de embalses, emplearemos el método de Rippl, también conocido como diagrama de masas. El enfoque se basa en calcular la capacidad de almacenamiento necesaria para satisfacer las demandas de agua de una región o cuenca específica. Para aplicar este método, se requiere tener datos hidrológicos, como los caudales de entrada y salida, así como la información sobre la demanda de agua. Con los flujos de entrada se construye una curva de volumen acumulado, en función del tiempo (línea azul, Figura 1). En un segundo paso se traza una recta desde el punto inicial al final de la curva acumulada de entrada (AB, Figura 1). En un tercer paso se trazan líneas paralelas a la recta del paso anterior que sean tangenciales a la curva acumulada en un solo punto y no se crucen con la curva acumulada, de tal manera de trazar una curva máxima (i.e., tangente en Q Figura 1) y una curva mínima (i.e., tangente en T Figura 1). Finalmente, se estima la distancia vertical, que representa el volumen de almacenamiento (QU, Figura 1).

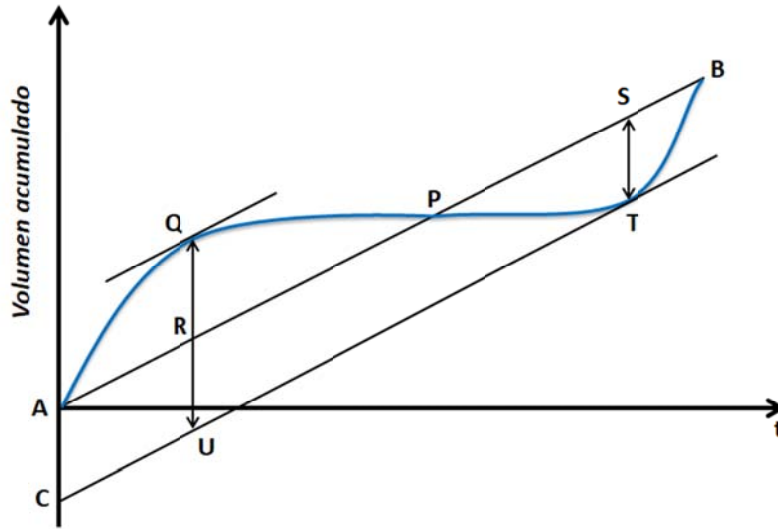


Figura 1: Ejemplo esquemático del método de Rippl

5.2. Generación de Series de Tiempo Sintéticas:

Se requiere evaluar cómo funciona el dimensionamiento de embalses explicado en la sección 5.1, ante escenarios no estacionarios, para lo cual se generarán series sintéticas de caudales. Dado que los caudales suelen tener una asimetría positiva, es que se adoptará una distribución log-normal para normalizar los caudales sintéticos de entrada al embalse. Luego de normalizar los caudales con una distribución log-normal, se utiliza un modelo AR(p), para simular una memoria temporal (Figura 2). Por último, por simplicidad, se asumirá que no hay estacionalidad (lo que ocurre con caudales anuales o en zonas sin estaciones marcada a lo largo del año).

$$X_t = \phi X_{t-1} + \varepsilon_t \quad (1)$$

Dónde:

- X_t es el caudal normalizado en el año t.
- ϕ es el coeficiente autorregresivo.
- X_{t-1} es la observación en el tiempo “t-1”.
- ε_t es el término del error (tiene distribución normal).

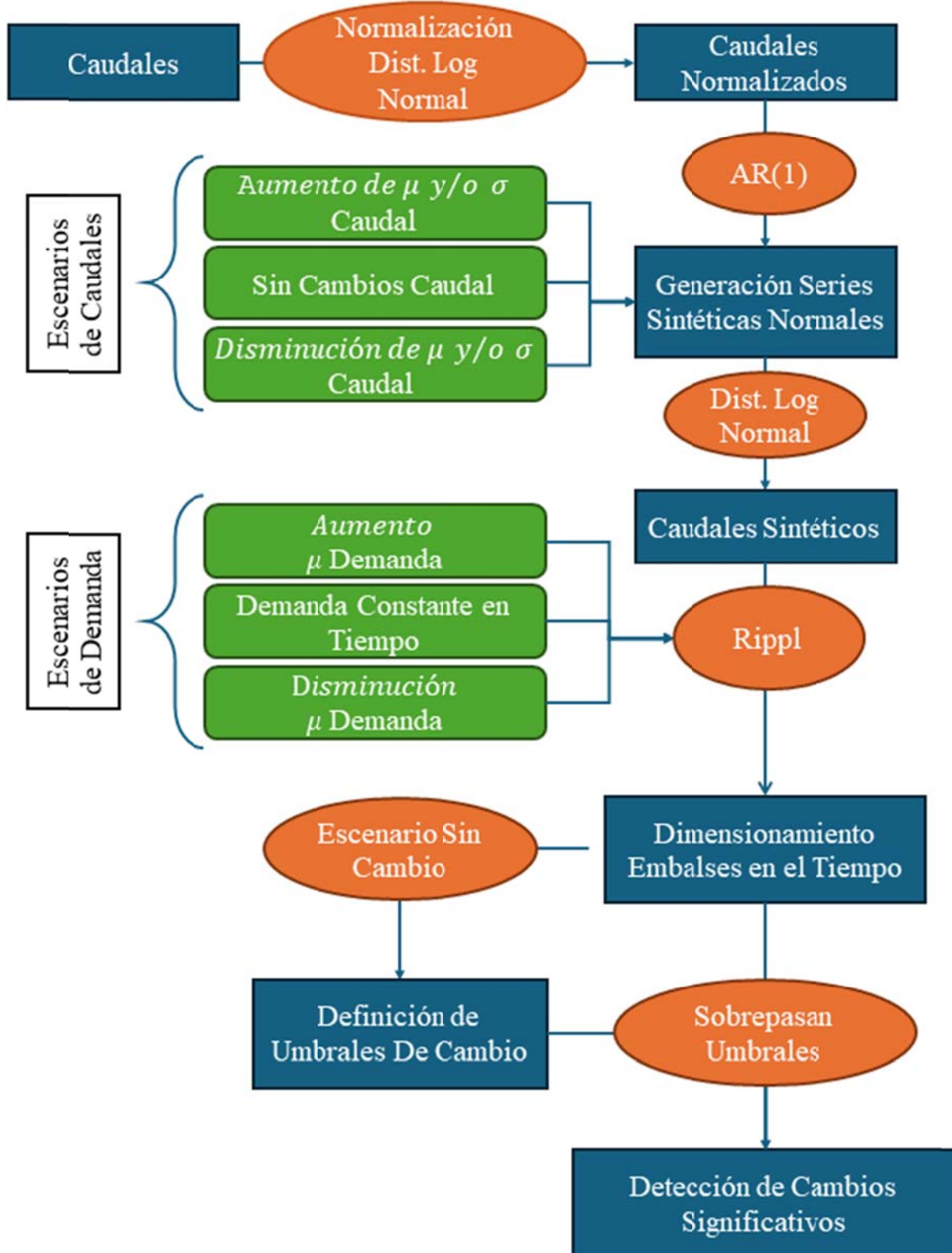


Figura 2: Esquema metodología

Una de las cualidades de los modelos autorregresivos $AR(p)$, es que simulan series de tiempo con memoria temporal, es decir simulan la relación entre un valor y lo que ha ocurrido en instantes de tiempo anteriores (Casas y Mejía, 2017). En este trabajo se utilizará un modelo autorregresivo de orden 1 ($AR(1)$), lo que asume que existe memoria lineal por un solo instante de tiempo, dado esto el valor actual de la serie de tiempo es una combinación lineal del valor previo y un término de error (que distribuye normal), expresado mediante la Ec. (1).

Para poder analizar el comportamiento del dimensionamiento de embalses, en diversos escenarios cambiantes, se utilizarán los escenarios descritos en el esquema de la Figura 2. En particular, se analizan posibles cambios en la media y desviación estándar del caudal de entrada, así como cambios en la demanda o caudal de salida. Las combinaciones de estos cambios se muestran en la Figura 2, teniendo escenarios con demanda constante, o una demanda que presentará una variación lineal en el tiempo. Para ambos escenarios se simularán 3 situaciones: primero un cambio lineal en la media del caudal de entrada, segundo un cambio lineal en la desviación estándar del caudal de entrada y tercero un cambio lineal en ambas (media y desviación estándar del caudal de entrada) al mismo tiempo.

Todos los casos de la Figura 2 inician con una distribución normal con valores de caudales de entrada con medias de $1 \text{ [m}^3/\text{s]}$, una desviación estándar de $0,5 \text{ [m}^3/\text{s]}$ y una autocorrelación igual a $0,1$ (notar que el parámetro ϕ de la Ec. (1) es igual a la autocorrelación). Estos parámetros son de referencia, se hacen diversos análisis de sensibilidad en la desviación estándar, para entender cómo afecta esto. Se analizarán 7 casos de variaciones en los caudales de entrada ya sea para cambio en la media (Figura 3) o la desviación estándar (Figura 4), siendo el caso 1 una disminución del 4% por década, el caso 2 una disminución del 2% por década, el caso 3 una disminución del 1% por década, el caso 4 no presenta variación en el tiempo, el caso 5 un aumento del 1% por década, el caso 6 un aumento del 2% por década y el caso 7 un aumento del 4% por década. Cada simulación presentará 1000 series con 120 años en cada una, partiendo con 20 años sin cambios, seguido de un cambio lineal durante los siguientes 100 años.

La simulación de la demanda tiene dos casos, primero se tiene valor constante en el tiempo y luego se tienen demandas que varían linealmente en el tiempo. Para el primer caso, el valor constante de referencia se calcula de tal manera que la demanda acumulada sea equivalente al volumen acumulado del caudal de entrada luego de 120 años de simulación de un caudal estacionario. En el primer caso también se sensibiliza la importancia de tener diferentes valores de demanda, probando 5 escenarios de demanda constante. Uno de los escenarios de demanda es el de referencia, previamente descrito con un valor de $0,4248 \text{ [m}^3/\text{s]}$ (valor base definido para ser mayor al volumen acumulado y así presentar escenarios con una demanda mayor), los otros 4 escenarios de demanda constante, dos representan valores de $0,4673 \text{ [m}^3/\text{s]}$ y $0,5098 \text{ [m}^3/\text{s]}$, que son un 10% y 20% más que el escenario de referencia. Por último, están los escenarios constantes con valores $0,3823 \text{ [m}^3/\text{s]}$ y $0,3398 \text{ [m}^3/\text{s]}$, que son un 10% y 20% menos que el escenario de referencia. En segundo caso, se tiene aquellos escenarios con demanda variable (valor base definido para ser el mismo valor en el año 120 al volumen acumulado) en el tiempo la que aumentará o disminuirá a tasas de 1,5% y 3% por década. La demanda en este segundo caso, se simula por 20 años sin cambios, para luego tener las tasas de cambio lineal por los siguientes 100 años.

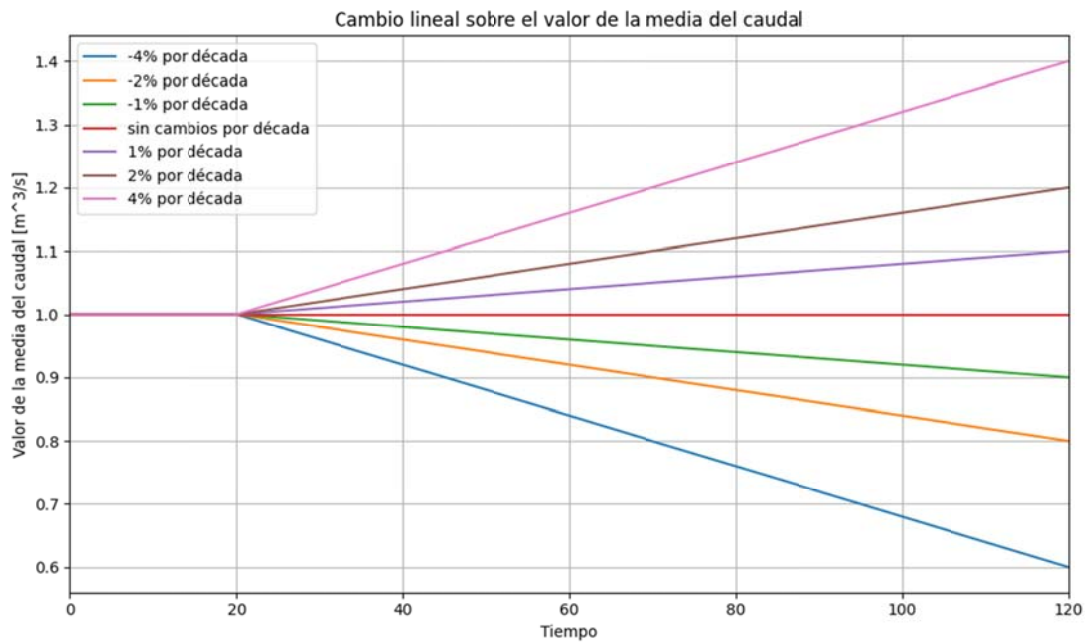


Figura 3: Cambio lineal en el valor de la media del caudal para cada caso a lo largo de las series

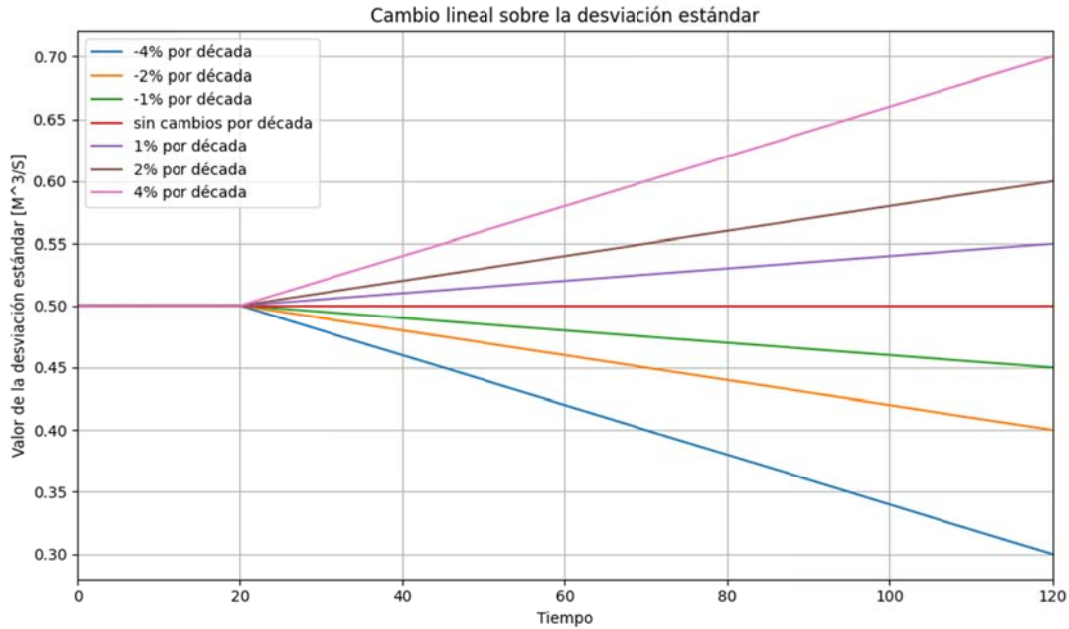


Figura 4: Cambio lineal en la desviación estándar para cada caso a lo largo de las series

5.3. Detección de Cambios Significativos en el Dimensionamiento de Embalses:

Para identificar cambios temporales en el dimensionamiento de embalses (Figura 2), se emplearán ventanas móviles de 20 años. Dado que se analizan 120 años en total (incluyendo los primeros 20 años estacionarios), se obtienen 101 ventanas de 20 años cada una. En cada una de estas ventanas, se aplicará el método de Rippl para calcular el dimensionamiento del embalse. En el escenario estacionario sin cambios, se determinan los umbrales de dimensionamiento asociados a los percentiles 99,5 y 0,5 (i.e., dado que son 1000 escenarios esto corresponde a la serie cuyo dimensionamiento está en el percentil 99,5 o 0,5 percentil por variabilidad natural), correspondientes a un nivel de significancia del 1%, utilizando las 1000 series sintéticas generadas. Estos umbrales de referencia se aplican posteriormente a los escenarios con cambios para detectar el porcentaje de casos que exceden dichos límites. Si un escenario con cambios sobrepasa estos umbrales, se considera que ha ocurrido un cambio significativo. Finalmente, se representará gráficamente el porcentaje anual de series que exceden estos umbrales, lo que permitirá observar el comportamiento de los diferentes escenarios y determinar en qué momento el 50% de estas 1000 series simuladas supera el umbral. Además, se calculará el tiempo de transición, definido por el tiempo que se tarda en sobrepasar el intervalo comprendido entre el percentil 20% y 80%.

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los resultados obtenidos están organizados en las secciones 6.1 y 6.2. La primera sección presenta diversas simulaciones con una demanda constante a lo largo del periodo, utilizando diversos valores de demanda. La segunda se enfoca en simulaciones con una demanda que varía de forma lineal a lo largo del tiempo, siguiendo un comportamiento similar al presentado en la Figura 3.

6.1. Escenario con demanda constante:

En esta sección, se presenta el porcentaje de los escenarios que excede los umbrales de cambio en las simulaciones que presentan variación en el valor de la media del caudal de entrada, variación en el valor de la desviación estándar y variación en ambos valores respectivamente junto a un valor de la demanda constante. El análisis de estos resultados se abordará en las subsecciones 6.1.1, 6.1.2 y 6.1.3, representando los cambios en el valor de la media del caudal de entrada, la desviación estándar del caudal de entrada y ambos al mismo tiempo, respectivamente.

La Tabla 1 muestra el resultado de las diversas simulaciones al realizar un análisis de sensibilidad de la demanda, donde los valores en la tabla indican el año en que más del 50% de las series simuladas superan los umbrales definidos por los percentiles 99,5 y 0,5. Mayor detalle de las simulaciones se encuentran en los anexos A, B y C.

En la Tabla 2 se muestra el tiempo de transición o cambio de las distintas simulaciones, donde se representa la cantidad de años en los que tarda cada caso en pasar del percentil 20 al percentil 80. Los números de color rojo presentes en las Tablas 2 y 4, indican los casos donde el dimensionamiento de embalses ha quedado subdimensionado, lo que quiere decir que las series sobrepasan el umbral superior (percentil 99,5), mientras que el color azul, indica que los embalses podrían ser más pequeños, es decir, se sobrepasa el límite inferior (percentil 0,5). Además, los números que presentan el signo “+” indican aquellos casos que sobrepasan el percentil 20 y 50 pero que no se alcanzan el percentil 80, por lo tanto, se toma la diferencia entre el último año de simulación y el año en el cual se alcanza el percentil 20. Estas tablas presentan un valor constante en la desviación estándar y en la demanda, notar que la demanda es constante en el tiempo, pero se ha realizado un análisis de sensibilidad de esta.

Tabla 1: Detección de cambio en dimensionamiento de embalses, con análisis de sensibilidad en la demanda (caso base en amarillo).

			Cambios del caudal de entrada en el tiempo							
			Valor Desv. Estándar	Valor Demanda	-4% por década	-2% por década	-1% por década	1% por década	2% por década	4% por década
Análisis Sensibilidad de Demanda	Cambio lineal en MU	SIGMA X = 0,5	Demanda 0,3398 [m³/s]	33	54	99	-	-	-	
		SIGMA X = 0,5	Demanda 0,3823 [m³/s]	27	44	77	-	-	-	
		SIGMA X = 0,5	Demanda 0,4248 [m³/s]	26	41	69	-	-	-	
		SIGMA X = 0,5	Demanda 0,4673 [m³/s]	26	41	68	63	37	26	
		SIGMA X = 0,5	Demanda 0,5098 [m³/s]	26	41	68	59	35	24	
	Cambio lineal en SIGMA	SIGMA X = 0,5	Demanda 0,3398 [m³/s]	-	-	-	-	-	60	
		SIGMA X = 0,5	Demanda 0,3823 [m³/s]	-	-	-	-	81	47	
		SIGMA X = 0,5	Demanda 0,4248 [m³/s]	-	-	-	-	77	44	
		SIGMA X = 0,5	Demanda 0,4673 [m³/s]	37	62	-	-	75	43	
		SIGMA X = 0,5	Demanda 0,5098 [m³/s]	35	59	-	-	75	43	
	Cambio lineal en MU y SIGMA	SIGMA X = 0,5	Demanda 0,3398 [m³/s]	52	95	-	-	-	-	
		SIGMA X = 0,5	Demanda 0,3823 [m³/s]	42	73	-	-	-	-	
		SIGMA X = 0,5	Demanda 0,4248 [m³/s]	39	67	-	-	-	-	
		SIGMA X = 0,5	Demanda 0,4673 [m³/s]	39	65	-	-	62	37	
		SIGMA X = 0,5	Demanda 0,5098 [m³/s]	39	65	-	-	58	35	

Tabla 2: Detección de duraciones de los periodos de transición (caso base en amarillo).

			Cambios del caudal de entrada en el tiempo							
			Valor Desv. Estándar	Valor Demanda	-4% por década	-2% por década	-1% por década	1% por década	2% por década	4% por década
Análisis Sensibilidad de Demanda	Cambio lineal en MU	SIGMA X = 0,5	Demanda 0,3398 [m³/s]	9	22	+23	-	-	-	
		SIGMA X = 0,5	Demanda 0,3823 [m³/s]	9	18	35	-	-	-	
		SIGMA X = 0,5	Demanda 0,4248[m³/s]	9	16	35	-	-	-	
		SIGMA X = 0,5	Demanda 0,4673 [m³/s]	8	16	33	40	21	10	
		SIGMA X = 0,5	Demanda 0,5098 [m³/s]	8	16	33	34	19	10	
	Cambio lineal en SIGMA	SIGMA X = 0,5	Demanda 0,3398 [m³/s]	-	-	-	-	-	27	
		SIGMA X = 0,5	Demanda 0,3823 [m³/s]	-	-	-	-	+40	21	
		SIGMA X = 0,5	Demanda 0,4248 [m³/s]	-	-	-	-	42	21	
		SIGMA X = 0,5	Demanda 0,4673 [m³/s]	18	35	-	-	42	20	
		SIGMA X = 0,5	Demanda 0,5098 [m³/s]	18	32	-	-	42	19	
	Cambio lineal en MU y SIGMA	SIGMA X = 0,5	Demanda 0,3398 [m³/s]	19	+23	-	-	-	-	
		SIGMA X = 0,5	Demanda 0,3823 [m³/s]	15	33	-	-	-	-	
		SIGMA X = 0,5	Demanda 0,4248 [m³/s]	14	30	-	-	-	-	
		SIGMA X = 0,5	Demanda 0,4673 [m³/s]	15	30	-	-	42	21	
		SIGMA X = 0,5	Demanda 0,5098 [m³/s]	15	29	-	-	35	19	

Las Tablas 3 y 4 son similares a las Tablas 1 y 2 respectivamente, donde la Tabla 3 muestra el resultado de las diversas simulaciones al realizar un análisis de sensibilidad sobre la desviación estándar, donde los valores en la tabla indican el año en que más del 50% de las series simuladas superan los umbrales definidos por los percentiles 99,5 y 0,5. En la Tabla 4 se muestra el tiempo de transición o cambio de las distintas simulaciones, donde se representa la cantidad de años en los que tarda cada caso en pasar del percentil 20 al percentil 80. Estas tablas presentan un valor constante en la demanda de 0,4248 [m³/s] y desviación estándar a lo largo de la simulación, pero este último presenta cambios en su valor inicial.

Tabla 3: Detección de cambio en dimensionamiento de embalses, con análisis de sensibilidad en la desviación estándar (caso base en amarillo).

		Cambios del caudal de entrada en el tiempo							
		Valor Desv. Estándar	Valor Demanda	-4% por década	-2% por década	-1% por década	1% por década	2% por década	4% por década
Análisis Sensibilidad de Sigma	Cambio lineal en MU	SIGMA X = 0,3	Demanda 0,4248 [m ³ /s]	54	93	-	-	-	-
		SIGMA X = 0,5	Demanda 0,4248 [m ³ /s]	26	41	69	-	-	-
		SIGMA X = 0,7	Demanda 0,4248 [m ³ /s]	28	44	76	64	38	25
	Cambio lineal en SIGMA	SIGMA X = 0,3	Demanda 0,4248 [m ³ /s]	-	-	-	-	-	-
		SIGMA X = 0,5	Demanda 0,4248 [m ³ /s]	-	-	-	-	77	44
		SIGMA X = 0,7	Demanda 0,4248 [m ³ /s]	35	58	-	-	74	43
	Cambio lineal en MU y SIGMA	SIGMA X = 0,3	Demanda 0,4248 [m ³ /s]	76	-	-	-	-	-
		SIGMA X = 0,5	Demanda 0,4248 [m ³ /s]	39	67	-	-	-	-
		SIGMA X = 0,7	Demanda 0,4248 [m ³ /s]	46	79	-	-	72	42

Tabla 4: Detección de duraciones de los periodos de transición (caso base en amarillo).

		Cambios del caudal de entrada en el tiempo							
		Valor Desv. Estándar	Valor Demanda	-4% por década	-2% por década	-1% por década	1% por década	2% por década	4% por década
Análisis Sensibilidad de Sigma	Cambio lineal en MU	SIGMA X = 0,3	Demanda 0,4248 [m ³ /s]	8	+19	-	-	-	-
		SIGMA X = 0,5	Demanda 0,4248 [m ³ /s]	9	16	35	-	-	-
		SIGMA X = 0,7	Demanda 0,4248 [m ³ /s]	10	18	37	41	21	10
	Cambio lineal en SIGMA	SIGMA X = 0,3	Demanda 0,4248 [m ³ /s]	-	-	-	-	-	-
		SIGMA X = 0,5	Demanda 0,4248 [m ³ /s]	-	-	-	-	42	21
		SIGMA X = 0,7	Demanda 0,4248 [m ³ /s]	17	32	-	-	42	20
	Cambio lineal en MU y SIGMA	SIGMA X = 0,3	Demanda 0,4248 [m ³ /s]	11	-	-	-	-	-
		SIGMA X = 0,5	Demanda 0,4248 [m ³ /s]	14	30	-	-	-	-
		SIGMA X = 0,7	Demanda 0,4248 [m ³ /s]	18	36	-	-	45	25

6.1.1. Cambio en la media del caudal de entrada:

En esta situación la desviación estándar se mantiene constante y el cambio lineal se produce sobre el valor de la media del caudal de entrada (línea gris en las Tablas 1, 2, 3 y 4). Al analizar los resultados utilizando distintos valores en la demanda (Tabla 1), se puede apreciar que el disminuir la demanda en un 10% y 20% ($0,3823 \text{ m}^3/\text{s}$ y $0,3398 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivamente) solo logra atrasar de manera importante los impactos sobre el dimensionamiento de embalses para la disminución de un 1% por década sobre el valor de la media del caudal de entrada, generando un cambio de 30 años. Para la disminución de un 4% por década, el impacto es menor (solo 7 años). Por otro lado, hay una asimetría en el comportamiento dado que al aumentar el valor base de la demanda en un 10% y 20% sobre el valor base, no genera un adelantamiento en los resultados (Tabla 1).

En la Tabla 2 se presentan los tiempos de transición, donde se observa que las disminuciones por década en disponibilidad de agua, generan una necesidad de embalses de mayor tamaño (color rojo), a diferencia de los aumentos en la disponibilidad de agua, que generan embalses más pequeños (color azul). Es interesante destacar que los periodos de transición no cambian mucho con diferentes demandas cuando disminuye la oferta de agua (Tabla 2), a excepción del caso con disminución de 2% por década que presenta un período de transición levemente mayor a medida que disminuye la demanda de agua.

Los cambios en la desviación estándar del caudal de entrada (línea gris en la Tabla 3) generan cambios en los tiempos para detectar cambios significativos. El tener una menor desviación estándar en los caudales de entrada (sigma de 0,3) posterga el identificar un cambio significativo, siempre que haya un cambio importante en el tiempo, por ejemplo, un 4% de disminución por década en el caudal de entrada. Por el contrario, cuando se tiene una desviación estándar inicial grande (sigma de 0,7) y una disminución por década menor (por ejemplo, un 1% por década en el caudal de entrada), también se posterga unos años los cambios significativos, en comparación con el caso base. Notar que en caso de un aumento en el caudal de entrada, solo se notan cambios significativos en el dimensionamiento para casos con desviación estándar grande (Tabla 3).

Al contrarrestar estos resultados con la Tabla 4 (que tiene tiempos de transición), se observa que, si la desviación estándar es pequeña, la mayoría de los casos no alcanza a superar el percentil 80 (solo con una disminución de 4% por década se tiene un periodo de transición). Por lo tanto, en esos casos habrá un mayor periodo de tiempo en el que se pueda actuar en comparación al caso base. Una mayor desviación estándar tiende a aumentar levemente los años de transición.

6.1.2. Cambio en la desviación estándar del caudal de entrada:

En esta situación se quiere analizar cambios lineales en el tiempo sobre la desviación estándar del caudal de entrada, mientras que se mantiene constante la media del caudal (línea naranja en las Tablas 1, 2, 3 y 4). El tener una disminución en la desviación estándar del caudal de entrada, no permite detectar cambios significativos en el dimensionamiento de embalses (Tabla 1), excepto que esté asociado a una gran demanda, por ejemplo, un aumento de un 10% o 20% de esta (demandas de 0,4673 m³/s y 0,5098 m³/s respectivamente). Por otro lado, aumentos en la desviación estándar sí generan cambios que son significativos, sobre todo mientras mayor sea el aumento. En particular, se detectan cambios para aumentos de un 2% y 4% por década, siendo más temprano con el mayor aumento. La magnitud de la demanda no cambia mucho los resultados, pero una menor demanda tiende a atrasar la detección.

Respecto al periodo de transición, un aumento lineal en la desviación estándar del caudal de entrada genera la necesidad de embalses más grandes, mientras que una disminución por década en la desviación estándar del caudal de entrada requerirá embalses más pequeños (Tabla 2). Notar que variar el valor base de la demanda de agua no afecta mucho los años de transición, ahora una disminución muy grande en la demanda, hace que no se detecten cambios significativos.

Cuando se mantiene la misma demanda y se cambia la desviación estándar del caudal de entrada (línea naranja en la Tabla 3), se observa en los resultados que al tener un valor más pequeño en comparación al caso base en la desviación estándar, se posterga la detección de diferencias significativas en el dimensionamiento de embalses. Por el contrario, cuando se tiene un sigma inicial más grande hace que la detección de cambios sea más fácil, sobre todo cuando va acompañada de un gran cambio por década de la desviación estándar, como lo es un aumento o disminución de un 4% por década (Tabla 3).

Respecto a los periodos de transición (Tabla 4), se observa que cuando se presenta una mayor desviación estándar inicial en el caudal de entrada, con una disminución por década en la desviación estándar del caudal de entrada los periodos de transición son más pequeños, mientras que los casos con aumento por década en la desviación estándar del caudal de entrada presentan periodos de transición muy similares al del caso base.

De las Tablas 2 y 4, se observa que los escenarios con aumento por década en la desviación estándar requerirán embalses de mayor tamaño. A diferencia de los escenarios con disminución por década de la desviación estándar en el caudal de entrada que sobrepasan el límite inferior, que conlleva embalses más pequeños. Este resultando es contrario a lo que ocurre con cambios en la media del caudal de entrada, en que un aumento de la media conlleva embalses más pequeños, mientras que una disminución genera embalses más grandes.

6.1.3. Cambio en la media y desviación estándar del caudal de entrada:

En las secciones anteriores se ha analizado cambios en la media y la desviación estándar de manera separada, para entender cómo cada uno de estos cambios sobre el caudal de entrada presionan un sistema hacia embalses más pequeños o grandes. En esta sección se analizará cambios simultáneos en la media y desviación estándar del caudal de entrada, fenómeno que se acerca más a posibles cambios reales (línea verde en las Tablas 1, 2, 3 y 4).

Una disminución en la demanda de agua genera un atraso en la fecha en que se detectan cambios significativos sobre el dimensionamiento de embalses (Tabla 1), esto se aprecia particularmente para disminuciones en la demanda de un 10% y 20%, en conjunto con una disminución del 4% y 2% por década sobre el valor de la media y desviación estándar del caudal de entrada. Por otro lado, cuando se presenta una demanda 10% y 20% mayor, también se detectan cambios significativos en el dimensionamiento de embalses cuando existe un aumento de la media y desviación estándar del caudal de entrada en un 2% y 4% por década. Mientras que en las disminuciones de un 2% y 4% por década el aumento en la demanda no cambia mucho el año en que ocurre el cambio significativo.

En el período de transición (Tabla 2), para el escenario con disminución de la media y desviación estándar del caudal, se observa que cambios en la demanda no generan grandes cambios en los años de transición (solo el caso con disminución por década de un 2% y una disminución de un 20% en la demanda presenta un periodo de transición que supera el tiempo simulado). Por otro lado, los escenarios con aumento por década sobre el valor de la media y la desviación estándar del caudal de entrada, junto a una demanda mayor, presentan un periodo de transición menor al aumentar la demanda.

Cuando se mantiene constante la demanda y se varía el sigma inicial (línea verde en la Tabla 3), se observa que un sigma inicial más pequeño retrasa los años en los que se alcanza el percentil 50, lo cual podría interpretarse como un escenario más favorable. Al comparar estos resultados con los de la Tabla 4, se aprecia que, en escenarios donde el sigma inicial es menor, la mayoría de los casos no alcanzan a superar el percentil 50, por otro lado, cuando el sigma inicial es mayor, los casos con disminución por década presentan un ligero aumento en los años de transición, mientras que los casos con aumento por década ven una disminución en esos años.

Es relevante destacar que el comportamiento observado cuando se cambia tanto la media como la desviación estándar del caudal de entrada es muy similar al de los casos donde solo se cambia la media del caudal de entrada. Sin embargo, el cambio en la desviación estándar tiende a retrasar los tiempos de detección de cambios significativos, lo que sugiere que, aunque el cambio en la media es el factor predominante, las alteraciones en la desviación estándar juegan un papel importante al influir en los tiempos de detección de estos cambios.

6.2. Escenario con demanda variable:

En esta sección, se presenta el porcentaje de los escenarios que excede los umbrales de cambio en las simulaciones que presentan variación en el valor de la media del caudal de entrada, variación en el valor de la desviación estándar y variación en ambos valores respectivamente junto a una variación en el valor de la demanda. El análisis de estos resultados se abordará en las subsecciones 6.2.1, 6.2.2 y 6.2.3 donde presentan los cambios en el valor de la media del caudal de entrada, desviación estándar del caudal de entrada y ambos al mismo tiempo respectivamente.

La Tabla 5 muestra el resultado de las diversas simulaciones al realizar un análisis de sensibilidad de la demanda que va variando su valor a lo largo de la simulación, donde los valores en la tabla indican el año en que más del 50% de las series simuladas superan los umbrales definidos por los percentiles 99,5 y 0,5. Mayor detalles de las simulaciones se encuentran en los anexos D, E y F.

En la Tabla 6 se muestra el tiempo de transición o cambio de las distintas simulaciones, donde se representa la cantidad de años en los que tarda cada caso en pasar del percentil 20 al percentil 80. Los números de color rojo presentes en las Tablas 2 y 4, indican los casos donde el dimensionamiento de embalses ha subdimensionado, lo que quiere decir que las series sobrepasan el umbral superior (percentil 99,5), mientras que el color azul, indica que los embalses podrían ser más pequeños, es decir, se sobrepasa el límite inferior (percentil 0,5). Además, los números que presentan el signo “+” indican aquellos casos que sobrepasan el percentil 20 y 50 pero que no se alcanzan el percentil 80, por lo tanto, se toma la diferencia entre el último año de simulación y el año en el cual se alcanza el percentil 20. Estas tablas presentan un valor constante en la desviación estándar y una demanda que tendrá una variación de un 1,5% o 3% por década en su valor, partiendo desde un valor base.

Tabla 5: Detección de cambio en dimensionamiento de embalses, con análisis de sensibilidad en la demanda (caso base en amarillo).

			Cambios del caudal de entrada en el tiempo							
			Valor Desv. Estándar	Valor Demanda	-4% por década	-2% por década	-1% por década	1% por década	2% por década	4% por década
Análisis Sensibilidad de Demanda	Cambio lineal en MU	SIGMA X = 0,5	Demanda 3% por década	44	61	79	-	-	-	
		SIGMA X = 0,5	Demanda 1,5% por década	35	51	73	-	-	-	
		SIGMA X = 0,5	Demanda constante	27	42	72	-	-	-	
		SIGMA X = 0,5	Demanda -1,5% por década	27	52	-	-	-	-	
		SIGMA X = 0,5	Demanda -3% por década	30	-	-	-	-	-	
	Cambio lineal en SIGMA	SIGMA X = 0,5	Demanda 3% por década	-	-	-	97	81	64	
		SIGMA X = 0,5	Demanda 1,5% por década	-	-	-	98	76	54	
		SIGMA X = 0,5	Demanda constante	-	-	-	-	78	45	
		SIGMA X = 0,5	Demanda -1,5% por década	-	-	-	-	-	63	
		SIGMA X = 0,5	Demanda -3% por década	-	-	-	-	-	-	
	Cambio lineal en MU y SIGMA	SIGMA X = 0,5	Demanda 3% por década	59	78	94	-	-	-	
		SIGMA X = 0,5	Demanda 1,5% por década	49	71	95	-	-	-	
		SIGMA X = 0,5	Demanda constante	40	69	-	-	-	-	
		SIGMA X = 0,5	Demanda -1,5% por década	49	-	-	-	-	-	
		SIGMA X = 0,5	Demanda -3% por década	-	-	-	-	-	-	

Tabla 6: Detección de duraciones de los periodos de transición (caso base en amarillo).

			Cambios del caudal de entrada en el tiempo							
			Valor Desv. Estándar	Valor Demanda	-4% por década	-2% por década	-1% por década	1% por década	2% por década	4% por década
Análisis Sensibilidad de Demanda	Cambio lineal en MU	SIGMA X = 0,5	Demanda 3% por década	5	9	12	-	-	-	
		SIGMA X = 0,5	Demanda 1,5% por década	6	12	17	-	-	-	
		SIGMA X = 0,5	Demanda constante	9	17	36	-	-	-	
		SIGMA X = 0,5	Demanda -1,5% por década	12	30	-	-	-	-	
		SIGMA X = 0,5	Demanda -3% por década	17	-	-	-	-	-	
	Cambio lineal en SIGMA	SIGMA X = 0,5	Demanda 3% por década	-	-	-	+12	14	10	
		SIGMA X = 0,5	Demanda 1,5% por década	-	-	-	+18	20	15	
		SIGMA X = 0,5	Demanda constante	-	-	-	-	42	21	
		SIGMA X = 0,5	Demanda -1,5% por década	-	-	-	-	-	49	
		SIGMA X = 0,5	Demanda -3% por década	-	-	-	-	-	-	
	Cambio lineal en MU y SIGMA	SIGMA X = 0,5	Demanda 3% por década	8	11	+15	-	-	-	
		SIGMA X = 0,5	Demanda 1,5% por década	10	16	+20	-	-	-	
		SIGMA X = 0,5	Demanda constante	16	31	-	-	-	-	
		SIGMA X = 0,5	Demanda -1,5% por década	25	-	-	-	-	-	
		SIGMA X = 0,5	Demanda -3% por década	-	-	-	-	-	-	

Las Tablas 7 y 8 son similares a las Tablas 5 y 6 respectivamente, donde la Tabla 7 muestra el resultado de las diversas simulaciones al realizar un análisis de sensibilidad sobre la desviación estándar, donde los valores en la tabla indican el año en que más del 50% de las series simuladas superan los umbrales definidos por los percentiles 99,5 y 0,5. En la Tabla 8 se muestra el tiempo de transición o cambio de las distintas simulaciones, donde se representa la cantidad de años en los que tarda cada caso en pasar del percentil 20 al percentil 80. Estas tablas presentan un valor variable en la demanda junto a diversos valores de desviación estándar.

Tabla 7: Detección de cambio en dimensionamiento de embalses, con análisis de sensibilidad en la desviación estándar (caso base en amarillo).

				Cambios del caudal de entrada en el tiempo							
				Valor Desv. Estándar	Valor Demanda	-4% por década	-2% por década	-1% por década	1% por década	2% por década	4% por década
Análisis Sensibilidad de Sigma	Cambio lineal en MU	SIGMA X = 0,7	Demanda 1,5% por década	39	55	77	-	52	26		
		SIGMA X = 0,7	Demanda constante	28	44	76	64	38	25		
		SIGMA X = 0,7	Demanda -1,5% por década	28	62	-	74	54	37		
		SIGMA X = 0,5	Demanda 1,5% por década	35	51	73	-	-	-		
		SIGMA X = 0,5	Demanda constante	27	42	72	-	-	-		
		SIGMA X = 0,5	Demanda -1,5% por década	27	52	-	-	-	-		
		SIGMA X = 0,3	Demanda 1,5% por década	54	83	-	-	-	-		
		SIGMA X = 0,3	Demanda constante	61	-	-	-	-	-		
		SIGMA X = 0,3	Demanda -1,5% por década	71	-	-	-	-	-		
	Cambio lineal en SIGMA	SIGMA X = 0,7	Demanda 1,5% por década	42	-	-	98	77	56		
		SIGMA X = 0,7	Demanda constante	35	58	-	-	74	43		
		SIGMA X = 0,7	Demanda -1,5% por década	49	70	91	-	-	65		
		SIGMA X = 0,5	Demanda 1,5% por década	-	-	-	98	76	54		
		SIGMA X = 0,5	Demanda constante	-	-	-	-	78	45		
		SIGMA X = 0,5	Demanda -1,5% por década	-	-	-	-	-	63		
		SIGMA X = 0,3	Demanda 1,5% por década	-	-	-	-	-	-		
		SIGMA X = 0,3	Demanda constante	-	-	-	-	-	-		
		SIGMA X = 0,3	Demanda -1,5% por década	-	-	-	-	-	-		
	Cambio lineal en MU y SIGMA	SIGMA X = 0,7	Demanda 1,5% por década	57	79	-	-	-	63		
		SIGMA X = 0,7	Demanda constante	46	79	-	-	72	42		
		SIGMA X = 0,7	Demanda -1,5% por década	68	-	-	99	79	57		
		SIGMA X = 0,5	Demanda 1,5% por década	49	71	95	-	-	-		
		SIGMA X = 0,5	Demanda constante	40	69	-	-	-	-		
		SIGMA X = 0,5	Demanda -1,5% por década	49	-	-	-	-	-		
		SIGMA X = 0,3	Demanda 1,5% por década	72	-	-	-	-	-		
		SIGMA X = 0,3	Demanda constante	86	-	-	-	-	-		
		SIGMA X = 0,3	Demanda -1,5% por década	-	-	-	-	-	-		

Tabla 8: Detección de duraciones de los periodos de transición (caso base en amarillo).

			Cambios del caudal de entrada en el tiempo							
			Valor Desv. Estándar	Valor Demanda	-4% por década	-2% por década	-1% por década	1% por década	2% por década	4% por década
Análisis Sensibilidad de Sigma	Cambio lineal en MU	SIGMA X = 0,7	Demanda 1,5% por década	7	13	18	-	37	14	
		SIGMA X = 0,7	Demanda constante	10	18	37	41	21	10	
		SIGMA X = 0,7	Demanda -1,5% por década	14	39	-	23	15	10	
		SIGMA X = 0,5	Demanda 1,5% por década	6	12	17	-	-	-	
		SIGMA X = 0,5	Demanda constante	9	17	36	-	-	-	
		SIGMA X = 0,5	Demanda -1,5% por década	12	30	-	-	-	-	
		SIGMA X = 0,3	Demanda 1,5% por década	7	14	-	-	-	-	
		SIGMA X = 0,3	Demanda constante	10	-	-	-	-	-	
		SIGMA X = 0,3	Demanda -1,5% por década	12	-	-	-	-	-	
	Cambio lineal en SIGMA	SIGMA X = 0,7	Demanda 1,5% por década	25	-	-	+16	18	14	
		SIGMA X = 0,7	Demanda constante	17	32	-	-	42	20	
		SIGMA X = 0,7	Demanda -1,5% por década	12	19	+21	-	-	57	
		SIGMA X = 0,5	Demanda 1,5% por década	-	-	-	+17	20	15	
		SIGMA X = 0,5	Demanda constante	-	-	-	-	42	21	
		SIGMA X = 0,5	Demanda -1,5% por década	-	-	-	-	-	49	
		SIGMA X = 0,3	Demanda 1,5% por década	-	-	-	-	-	-	
		SIGMA X = 0,3	Demanda constante	-	-	-	-	-	-	
		SIGMA X = 0,3	Demanda -1,5% por década	-	-	-	-	-	-	
	Cambio lineal en MU y SIGMA	SIGMA X = 0,7	Demanda 1,5% por década	12	17	-	-	-	54	
		SIGMA X = 0,7	Demanda constante	18	36	-	-	46	25	
		SIGMA X = 0,7	Demanda -1,5% por década	37	-	-	+16	24	17	
		SIGMA X = 0,5	Demanda 1,5% por década	10	16	+19	-	-	-	
		SIGMA X = 0,5	Demanda constante	16	31	-	-	-	-	
		SIGMA X = 0,5	Demanda -1,5% por década	25	-	-	-	-	-	
		SIGMA X = 0,3	Demanda 1,5% por década	8	-	-	-	-	-	
		SIGMA X = 0,3	Demanda constante	11	-	-	-	-	-	
		SIGMA X = 0,3	Demanda -1,5% por década	-	-	-	-	-	-	

6.2.1. Cambio en la media del caudal de entrada:

En esta situación la desviación estándar se mantiene constante y el cambio lineal se produce sobre el valor de la media del caudal de entrada (línea gris en las Tablas 5, 6, 7 y 8) junto a una demanda variable que aumenta o disminuye un 1,5% y un 3,0% por década.

Al analizar cambios lineales en la demanda (Tabla 5), se puede apreciar que el aumentar la demanda en un 1,5% y 3% por década, solo logra atrasar de manera importante los impactos sobre el dimensionamiento de embalses para la disminución de un 4% por década, generando un cambio de 17 años, mientras que para la disminución de un 1% por década, el impacto es menor (solo 7 años). Además, hay un comportamiento similar al disminuir la demanda, dado que una disminución de 1,5% y 3% por década sobre la demanda se genera una postergación mayor a excepción del caso con disminución de un 4% por década donde el atraso es menor.

En la Tabla 6 se presentan los tiempos de transición, donde se observa que las disminuciones por década en disponibilidad de agua, generan una necesidad de embalses de mayor tamaño (color rojo) Es interesante destacar que los periodos de transición cambian mucho con una disminución en la demanda cuando disminuye la oferta de agua (Tabla 6), a excepción del caso con disminución de 4% por década que presenta un período de transición que es solo levemente mayor a medida que disminuye la demanda de agua.

Los cambios en la desviación estándar del caudal de entrada (línea gris en la Tabla 7) generan cambios en los tiempos para detectar cambios significativos. Al presentar un sigma inicial más pequeño al del caso base y una disminución por década del valor de la media del caudal de entrada, se presenta una postergación en el año en el que la mitad de las series sobrepasan los límites en comparación a los casos con un sigma de 0,5. Para los casos que presentan un aumento por década en el valor de la media del caudal de entrada no alcanzan a tener más de la mitad de las series de cada caso por fuera de los límites. Para los escenarios con un valor del sigma inicial mayor al del caso base, se observa que independientemente del aumento o disminución por década en la demanda y en el valor de la media del caudal de entrada, se postergan los años en los que se alcanza el percentil 50 en comparación a los casos que presentan un sigma inicial igual a 0,5.

Al contrarrestar estos resultados con los de la Tabla 8, vemos que independientemente de si se tiene un valor del sigma inicial mayor o menor, se requieren embalses de mayor tamaño cuando se presenta una disminución por década en el valor de la media del caudal de entrada. Para los casos con aumento de la demanda el periodo de transición disminuye (caso contrario cuando disminuye la demanda) a diferencia de los casos con aumento por década del valor de la media del caudal de entrada donde el periodo de transición aumenta.

6.2.2. Cambio en la desviación estándar del caudal de entrada:

En esta situación se quiere analizar cambios lineales en el tiempo sobre la desviación estándar del caudal de entrada, mientras que se mantiene constante la media del caudal (línea naranja en las Tablas 5, 6, 7 y 8).

El tener una disminución en la desviación estándar del caudal de entrada, no permite detectar cambios significativos en el dimensionamiento de embalses (Tabla 5), ni para los casos con aumento o disminución de 1,5% o 3% por década en el valor de la demanda. Por otro lado, aumentos en la desviación estándar sí generan cambios que son significativos, sobre todo mientras mayor sea el aumento. En particular, se detectan cambios para aumentos de un 2% y 4% por década, postergando el cambio en unos años al aumentar 1,5% y 3% por década el valor de la demanda.

Respecto al periodo de transición, un aumento lineal en la desviación estándar del caudal de entrada genera la necesidad de embalses más grandes (Tabla 6). Notar que la disminución por década en la demanda de agua, presenta un aumento en el periodo de transición, mientras que un aumento por década en la demanda de agua, se presentarían periodos de transición más pequeños.

Cuando se cambia la demanda y la desviación estándar del caudal de entrada (línea naranja en la Tabla 7), se observa en los resultados que un sigma inicial más pequeño no hay detección de cambios dado que no se alcanza el percentil 50. Para los escenarios con un sigma inicial más grande, tanto para los casos con aumento como disminución por década en la demanda el percentil 50 se alcanza algunos años después a excepción de los casos con un aumento y disminución por década de 1% en la desviación estándar donde se anticipan unos años antes.

Al contrarrestar estos resultados con los de la Tabla 8, observamos que, en los escenarios con aumento por década en el valor de la demanda junto a una disminución en la desviación estándar del caudal de entrada, el periodo de transición aumenta. Por otro lado, para los escenarios con disminución por década en el valor de la demanda los periodos de transición disminuyen con la disminución en la desviación estándar del caudal de entrada.

De las Tablas 6 y 8, se observa que los escenarios con aumento por década en la desviación estándar del caudal de entrada requerirán embalses de mayor tamaño al sobrepasar el límite superior. Este resultando es contrario a lo que ocurre con cambios en la media del caudal de entrada, en que un aumento de la media conlleva embalses más pequeños, mientras que una disminución genera embalses más grandes.

6.2.3. Cambio en la media y desviación estándar del caudal de entrada:

En las secciones anteriores se ha analizado cambios en la media y la desviación estándar de manera separada, para entender cómo cada uno de estos cambios sobre el caudal de entrada presiona un sistema hacia embalses más pequeños o grandes, en conjunto con analizar como cambios en la demanda afecta esto. En esta sección se analizará cambios en la media y desviación estándar del caudal de entrada de manera simultánea, fenómeno que se acerca más a posibles cambios reales (línea verde en las Tablas 5, 6, 7 y 8)

Un aumento de 1,5% y 3% por década en el valor de la demanda de agua genera un atraso en la fecha en que se detectan cambios significativos sobre el dimensionamiento de embalses (Tabla 5). Esto fenómeno es más importante cuando el aumento de la demanda se combina con una disminución del 4% y 2% por década sobre el valor de la media y desviación estándar del caudal de entrada.

En el período de transición (Tabla 6), para el escenario con disminución de la media y desviación estándar del caudal de entrada, se observa que cambios en la demanda generan cambios en los años de transición. Un aumento en la demanda disminuye el periodo de transición a 8 años para el caso con disminución de 4% por década en el valor de la media y desviación estándar del caudal de entrada, mientras que para el caso con disminución de 2% por década se disminuye el periodo en 20 años.

Cuando se varía la demanda y el sigma inicial (línea verde en la Tabla 7), se observa que un sigma inicial más pequeño retrasa los años en los que se alcanza el percentil 50, lo cual podría interpretarse como un escenario más favorable.

Al comparar estos resultados con los de la Tabla 8, se aprecia que, en escenarios donde el sigma inicial es menor, la mayoría de los casos no alcanzan a superar el percentil 50. Por otro lado, cuando el sigma inicial es mayor, los casos con disminución por década sobre el valor de la media del caudal y desviación estándar junto a un aumento de la demanda, se presenta una disminución en los años de transición, mientras que con los casos con aumento por década en el valor de la media del caudal y desviación estándar los años de transición aumentan considerablemente.

Es relevante destacar que el comportamiento observado cuando se cambia tanto la media como la desviación estándar del caudal de entrada es muy similar al de los casos donde solo se cambia la media del caudal de entrada. Sin embargo, el cambio en la desviación estándar tiende a retrasar los tiempos de detección de cambios significativos para los casos con aumento por década, lo que sugiere que, aunque el cambio en la media es el factor predominante. Las alteraciones en la desviación estándar juegan un papel importante al influir en los tiempos de detección de estos cambios al retrasar aún más los tiempo de detección de cambios significativos.

Los resultados obtenidos proporcionan una visión clara del impacto del cambio climático en el dimensionamiento de embalses. A través de la evaluación de escenarios con demanda constante y variable, se identifican distintos patrones posibles. Los datos simulados evidencian cómo las variaciones en la demanda y las condiciones climáticas influyen en la capacidad de los embalses, siendo relevante considerar estos resultados al momento de dimensionar los embalses en un futuro.

7. CONCLUSIÓN Y DISCUSIÓN

En este trabajo se analizan los impactos que el cambio climático puede tener sobre el dimensionamiento de los embalses. Para entender estos impactos se analizan diversos escenarios de variación tanto en los caudales entrantes como en la demanda. Los escenarios de caudales entrantes son simulados por series sintéticas que consideran un aumento o disminución en el promedio y desviación estándar de estos. Los diferentes escenarios son utilizados para estudiar los efectos de estos en el proceso de dimensionamiento de embalses. En particular el interés de detectar cuando ocurrirán cambios significativos en el dimensionamiento de embalses y determinar los periodos de transición en que ocurren estos cambios. En esta sección se abordan las principales conclusiones de este trabajo, además de discutir qué tipo de cambios son los más esperados en las proyecciones de cambio climático y cómo esto afectará los embalses. Además, se discuten posibles estrategias de adaptación necesarias para mitigar los efectos negativos del cambio climático en el diseño de los embalses.

Los embalses construidos considerando condiciones climáticas históricas pueden no ser adecuados para manejar las nuevas realidades hídricas. Esto significa que, para adaptarse a estas variaciones, los embalses futuros deberán ser diseñados con una mayor capacidad de almacenamiento y mayor flexibilidad operativa (i.e., probar reglas de operación que se adapten a los cambios en el tiempo), mientras que la infraestructura existente debe ser reevaluada para ver como la capacidad puede ser aumentada para satisfacer la demanda con nuevos escenarios de sequía e inundaciones. En esta evaluación es fundamental implementar estrategias de adaptación basadas en simulaciones climáticas y en la gestión integrada de los recursos hídricos (Bertoni et al, 2021).

Por lo tanto, los resultados que se han obtenido sugieren que los embalses del futuro necesitarán un tamaño mayor y una operación más flexible para hacer frente a los efectos negativos del cambio climático.

- Al disminuir el valor de la media del caudal de entrada, se adelanta el momento en el cual se verán afectados los embalses y deberán aumentar su tamaño tanto para el escenario de demanda constante, como variable. Por ejemplo, en un escenario de demanda constante, con una tasa de disminución del -1% por década, los cambios se detectan a los 69 años. En contraste, con una tasa de -4% por década, los cambios se identifican a los 26 años.

- Al aumentar la desviación estándar del caudal de entrada se adelanta el momento en que se verán afectados los embalses y una mayor variabilidad genera la necesidad de embalses de mayor tamaño. Un aumento en la tasa de cambio de la desviación estándar disminuye los periodos de transición. Por ejemplo, en un escenario de demanda variable, con una tasa del 2% por década, los cambios se detectan a los 78 años y presentará un periodo de transición de 42 años, mientras que al tener una tasa del 4% por década, los cambios se detectan a los 45 años con un periodo de transición de 21 años.
- Cuando hay una disminución en la media y desviación estándar del caudal de entrada de manera simultánea, los cambios sobre el valor de la media del caudal son dominantes, tanto con demanda constante como variable. Esto conlleva requerir embalses más grandes cuando se presentan disminuciones en ambos momentos del caudal.
- La detección más temprana de cambio se detecta entre los 24 y 26 años, dependiendo del caso analizado. Dado que la infraestructura, como embalses, se evalúa a 30 años, el usar hidrología reciente parece un camino adecuado de adaptación al cambio climático. Es importante al diseñar un embalse con la hidrología existente reevaluar el diseño cada cierto periodo de tiempo para adaptar los objetivos de esta a una hidrología cambiante.
- Para todos los escenarios de demanda constante y una reducción en los caudales de entrada el pasar de una tasa de un -4% por década a una de un -2% por década, permite retrasar la reducción de cambio en al menos 15 años. Si esta tasa se reduce a un -1% por década, la detección se atrasa hasta 4 décadas o más en la mayoría de los escenarios. Esto destaca la importancia de implementar medidas de mitigación, las cuales permitirían reducir el impacto del cambio climático sobre los caudales.
- En algunos casos, los cambios pueden detectarse en el mismo año, sin embargo, el período de transición puede variar. Esto podría reducir el tiempo de reacción disponible para responder a los cambios provocados por el cambio climático. Un ejemplo de esto ocurre en un escenario con demanda variable y una tasa de disminución del -1% por década. En este caso, cuando la demanda aumenta o disminuye en un 1,5% por década, se observa una diferencia de 15 años en el período de transición (10 años con un aumento de la demanda y 25 años con una disminución de la demanda), a pesar de que ambos casos detectan el cambio en el año 49.

En este trabajo, se ha ilustrado que el cambio climático podría tener un impacto significativo en las dimensiones de los embalses debido a las alteraciones proyectadas en el ciclo hidrológico. Los distintos escenarios climáticos sustentan la afirmación anterior, vinculando la variabilidad en los patrones de precipitación, el aumento en las temperaturas y la mayor recurrencia de eventos extremos, como sequías y lluvias prolongadas, con los niveles de agua almacenada. Por un lado, estos cambios en las dimensiones de los embalses influirán en su habilidad para abastecer la demanda requerida a largo plazo. Por otro lado, estos dificultarán el diseño y la operación de los embalses. Por lo tanto, la implementación de las estrategias de adaptación basadas en modelos de alta resolución y en la gestión integrada de los recursos hídricos es crucial junto a investigaciones que incorporen una mayor cantidad de variables.

Para trabajos futuros se debiese investigar como las pérdidas por evaporación adquieren una mayor importancia bajo un escenario de cambio global y la incorporación de la estacionalidad en los trabajos futuros, junto a nuevos escenarios como por ejemplo un aumento el valor de la media del caudal de entrada junto a una disminución de la desviación estándar y viceversa. Otro aspecto que se requiere analizar en más detalle a futuro es si los resultados se mantienen probando con otros valores en los caudales y demandas. Además, en un futuro hay que estudiar si estos resultados se mantienen en casos de estudios en Chile y otros países donde se simulen proyecciones de cambio climático sobre caudales y se evalué su impacto sobre dimensionamiento de embalses. Dado que el método de Rippl es un enfoque simplificado de balance, en cuanto a las variables que considera para realizar el dimensionamiento, es importante realizar un análisis sobre la operación de estos embalses dimensionados para entender mejor el funcionamiento de estos métodos en escenarios no estacionarios. Se podría dar que el método esté dimensionando embalses que en un futuro tengan una muy baja probabilidad de llenado. También es interesante probar métodos (e.g., algoritmo de la sucesión de *peaks*, simulación de embalses) más complejos que puedan considerar más variables climáticas y un balance más realista.

8. BIBLIOGRAFÍA

Abbass, K., Qasim, M. Z., Song, H., Murshed, M., Mahmood, H., & Younis, I. (2022). A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(28), 42539-42559.

Allan, R. P., Barlow, M., Byrne, M. P., Cherchi, A., Douville, H., Fowler, H. J., ... & Zolina, O. (2020). Advances in understanding large-scale responses of the water cycle to climate change. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1472(1), 49-75.

Araya-Osses, D., et al., (2020). Climate change projections of temperature and precipitation in Chile based on statistical downscaling. *Climate Dynamics*, 54, 4309–4330. doi:10.1007/s00382-020-05231-4.

Armengol, J., Rodríguez, J. J., García, J. C., Ordóñez, J., & Marcé, R. (2009). La gestión de los embalses en relación a la calidad del agua en condiciones de sequía extrema. *Ingeniería del agua*, 16(4), 285-294.

Beguería, S., Haro-Monteagudo, D., Palazón, L., & García-Ruiz, J. M. (2022). Interacciones montaña-llanura frente al cambio global: desafíos y oportunidades en la gestión del territorio y de los recursos hídricos en Riegos del Alto Aragón. *Pirineos*, 177, e072-e072.

Bernstein, L., Bosch, P., Canziani, O., Chen, Z., Christ, R., & Riahi, K. (2007). IPCC, 2007: climate change 2007: synthesis report. http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/syr/e...

Bertoni, F., Giuliani, M., Castelletti, A., & Reed, P. M. (2021). Designing with information feedbacks: Forecast informed reservoir sizing and operation. *Water Resources Research*, 57(3), e2020WR028112. <https://doi.org/10.1029/2020WR028112>

Beven, K., & Binley, A. (1992). The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological processes*, 6(3), 279-298.

Bianucci, S. P. (2013). *Gestión óptima de embalses en avenidas incorporando al concepto de incertidumbre: aplicación a embalses con central hidroeléctrica* (Doctoral dissertation, Caminos).

Biblioteca del Congreso Nacional BCN (2011). Cambio climático y efectos actuales y potenciales sobre los recursos hídricos en Chile (Informe BCN). Elaborado por Baeza, E. (Mayo de 2017).

https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/24314/2/Informe_Cambio_Clim%C3%A1tico_y_RH_Chile_final.pdf#:~:text=Efectos%20en%20Chile&text=Estos%20efectos%20en%20el%20clima,y%20sequ%C3%ADas%20de%20mayor%20intensidad.

Campos, D. I. (2020). *Gestionando la mega sequía: Patente por Uso de Aguas* (Doctoral dissertation, Pontificia Universidad Católica de Chile (Chile)).

<https://www.proquest.com/openview/182c895d7d0423b0b6ed4138b4c01cbc/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y>

Casado, A. L., & Gil, V. (2006). Consecuencias de la variación de la disponibilidad hídrica en la cuenca del arroyo El Belisario, Buenos Aires, Argentina.

Casas, S., & Mejía, J. (2017). Modelo autorregresivo de primer orden aplicado a la predicción anual de caudales en la Amazonía peruana: Cuenca del río Mayo. In I International Congress on Water and Sustainability. UPC. Departament d'Enginyeria de Projectes i de la Construcció.

CEPAL (2012). Análisis de la vulnerabilidad del sector hidroeléctrico frente a escenarios futuros de cambio climático en Chile. Disponible en: <http://repositorio.cepal.org/handle/11362/5687>

Chadwick, C., Gironás, J., González-Leiva, F., & Aedo, S. (2023). Bias adjustment to preserve changes in variability: the unbiased mapping of GCM changes. *Hydrological Sciences Journal*, 1-18. <https://doi.org/10.1080/02626667.2023.2201450>

Chadwick, C., Gironás, J., Vicuña, S., Meza, F., & McPhee, J. (2018). Using a Statistical Preanalysis Approach as an Ensemble Technique for the Unbiased Mapping of GCM Changes to Local Stations. *Journal of Hydrometeorology*, 19(9), 1447-1465. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-17-0198.1>

Chou, C., & Neelin, J. D. (2004). Mechanisms of Global Warming Impacts on Regional Tropical Precipitation. *Journal of Climate*, 17(13), 2688-2701. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<2688:MOGWIO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<2688:MOGWIO>2.0.CO;2)

Cifuentes, L., Gironás, J., Meza, F., Vicuña, S. (2013). Marco Estratégico para la adaptación de la infraestructura al cambio climático. <https://cambioglobal.uc.cl/proyectos/72-marco-estrategico-para-la-adaptacion-de-la-infraestructura-al-cambio-climatico>

Cook, E. R., Seager, R., Heim Jr, R. R., Vose, R. S., Herweijer, C., & Woodhouse, C. (2010). Megadroughts in North America: Placing IPCC projections of hydroclimatic change in a long-term palaeoclimate context. *Journal of Quaternary Science*, 25(1), 48-61.

Dey, P., & Mishra, A. (2017). Separating the impacts of climate change and human activities on streamflow: A review of methodologies and critical assumptions. *Journal of Hydrology*, 548, 278-290.

Draper, A. J., & Lund, J. R. (2004). Optimal hedging and carryover storage value. *Journal of water resources planning and management*, 130(1), 83-87.

Eichert, B., & Davis, D. W. (1976). *Sizing flood control reservoir systems by systems analysis* (No. 44). Corps of Engineers, US Army.

Falvey, M. and R. Garreaud, 2009: Regional cooling in a warming world: Recent temperature trends in the SE Pacific and along the west coast of subtropical South America (1979-2006). *J. Geophys. Res.*, 114, D04102, doi:10.1029/2008JD010519.

Fawzy, S., Osman, A. I., Doran, J., & Rooney, D. W. (2020). Strategies for mitigation of climate change: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 18, 2069-2094.

Fernández B, Gironás J (2017) Drought characteristics, Chapter 79. In: Sing VJ (ed) *Handbook of hydrology*, 2nd edn. McGraw Hill, New York

Fernández, B., & Gironás, J. (2021). Droughts. En Fernández, B., & Gironás, J. (Eds.), *Water resources of Chile* (Vol. 8) (pp. 173-188). Tokyo: Springer.

Garreaud, R., 2011. Cambio Climático: Bases físicas e impactos en Chile. Revista Tierra Adentro, 93, 13–19. (INIA-Chile).

https://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/20.500.13082/29289/inia_RGS_final.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Garreaud RD, Alvarez-Garretón C, Barichivich J, Boisier JP, Christie D, Galleguillos M, LeQuesne C, McPhee J, Zambrano-Bigiarini M (2017) The 2010–2015 megadrought in Central Chile: impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrol Earth Syst Sci* 21(12):6307–6327

Geist, J. (2021). Green or red: Challenges for fish and freshwater biodiversity conservation related to hydropower. *Aquatic Conservation: Marine and freshwater ecosystems*, 31(7), 1551-1558.

Gómez-Limón, J. A. (2009). Implicaciones de la nueva planificación hidrológica para la agricultura de regadío. *Gómez-Limón, JA; Garrido, A.; Calatrava, J*, 22-53.

https://hispagua.cedex.es/sites/default/files/hispagua_documento/documentacion/documentos/economia_riegos.pdf#page=33

Gonzalez, A., Chase, J. M., & O'Connor, M. I. (2023). A framework for the detection and attribution of biodiversity change. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 378(1881), 20220182.

González, M. L. G., Escobar, Y. C., & Jiménez, H. (2007). La gestión integrada de los recursos hídricos como estrategia de adaptación al cambio climático. *Ingeniería y competitividad*, 9(1), 19-29. <https://doi.org/10.25100/iyc.v9i1.2492>

Herman, J. D., Quinn, J. D., Steinschneider, S., Giuliani, M., & Fletcher, S. (2020). Climate adaptation as a control problem: Review and perspectives on dynamic water resources planning under uncertainty. *Water Resources Research*, 56(2), e24389.

Huang, L., Zhou, M., Lv, J., & Chen, K. (2020). Trends in global research in forest carbon sequestration: A bibliometric analysis. *Journal of Cleaner Production*, 252, 119908.

Iglesias, A., Estrela, T., & Gallart, F. (2005). Impactos sobre los recursos hídricos. *Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático*. Ministerio de Medio Ambiente y Universidad de Castilla-La Mancha, 303-354.

IPCC. (2007). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, H.L. Miller (Eds.). Cambridge University Press: Cambridge, UK.

Konapala, G., Mishra, A. K., Wada, Y., & Mann, M. E. (2020). Climate change will affect global water availability through compounding changes in seasonal precipitation and evaporation. *Nature communications*, 11(1), 3044.

Loucks, D. P., & Van Beek, E. (2017). Water resource systems planning and management: An introduction to methods, models, and applications. Springer.

Martinez-Villalobos, C., & Neelin, J. D. (2023). Regionally high risk increase for precipitation extreme events under global warming. *Scientific Reports*, 13(1), 5579.

Marton, D., & Paseka, S. (2017). Uncertainty Impact on Water Management Analysis of Open Water Reservoir. *Environments*, 4(1), 10. <https://doi.org/10.3390/environments4010010>

Marton, D., Starý, M., & Menšík, P. (2014). Water management solution of reservoir storage function under condition of measurement uncertainties in hydrological input data. *Procedia Engineering*, 70, 1094-1101.

Mianabadi, A., Davary, K., Pourreza-Bilondi, M., & Coenders-Gerrits, A. M. J. (2020). Budyko framework; towards non-steady state conditions. *Journal of Hydrology*, 588, 125089.

Milly, P. C., Betancourt, J., Falkenmark, M., Hirsch, R. M., Kundzewicz, Z. W., Lettenmaier, D. P., & Krysanova, V. (2015). On critiques of “Stationarity is dead: Whither water management?”. *Water Resources Research*, 51(9), 7785-7789.

Monier, E., & Gao, X. (2015). Climate change impacts on extreme events in the United States: an uncertainty analysis. *Climatic Change*, 131, 67-81.

Ortega Gaucin, D. (2013). Sequía: causas y efectos de un fenómeno global. http://repositorio.imta.mx/bitstream/handle/20.500.12013/2085/OT_228.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Patskoski, J., and A. Sankarasubramanian (2015), Improved reservoir sizing utilizing observed and reconstructed streamflows within a Bayesian combination framework, *Water Resour. Res.*, 51, 5677–5697, doi:10.1002/2014WR016189.

Pepin, N. C., & Seidel, D. J. (2005). A global comparison of surface and free-air temperatures at high elevations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 110(D3).

Peralta Galvez, J., and Tapia Monsalve, L. D. (2019) “Determinación de la capacidad de embalse de la represa Ite
https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/626090/PeraltaG_J.pdf?sequence=3

Poff, N. L., Brown, C. M., Grantham, T. E., Matthews, J. H., Palmer, M. A., Spence, C. M., ... & Baeza, A. (2016). Sustainable water management under future uncertainty with eco-engineering decision scaling. *Nature Climate Change*, 6(1), 25-34.

Pokhrel, Y., Felfelani, F., Satoh, Y., Boulange, J., Burek, P., Gädeke, A., ... & Wada, Y. (2021). Global terrestrial water storage and drought severity under climate change. *Nature Climate Change*, 11(3), 226-233.

Poveda, G., & Álvarez, D. M. (2012). El colapso de la hipótesis de estacionariedad por cambio y variabilidad climática: implicaciones para el diseño hidrológico en ingeniería. *Revista de Ingeniería*, (36), 65-76.

Raje, D., & Mujumdar, P. P. (2010). Reservoir performance under uncertainty in hydrologic impacts of climate change. *Advances in water resources*, 33(3), 312-326.

Razavi, S., Tolson, B. A., & Burn, D. H. (2012). Review of surrogate modeling in water resources. *Water Resources Research*, 48(7).

Ríos, J. G., Alvarado, G. D. P. P., Gonzales, T. V. P., & Delgado, F. T. (2021). La Gestión de recursos hídricos: una revisión internacional de literatura. *Sapienza: International Journal of Interdisciplinary Studies*, 2(1), 186-199.

Roxy, M. K., Dasgupta, P., McPhaden, M. J., Suematsu, T., Zhang, C., & Kim, D. (2019). Twofold expansion of the Indo-Pacific warm pool warps the MJO life cycle. *Nature*, 575(7784), 647-651.

Rudeva, I., Boschat, G., Lucas, C., Ashcroft, L., Pepler, A., & Hope, P. (2023). Atmospheric trends explained by changes in frequency of short-term circulation patterns. *Communications Earth & Environment*, 4(1), 127.

Saab, S. M., Othman, F. B., Tan, C. G., Allawi, M. F., & El-Shafie, A. (2022). Review on generating optimal operation for dam and reservoir water system: simulation models and optimization algorithms. *Applied Water Science*, 12(4), 73.

Sandoval Erazo, Washington. (2018). Capítulo 1: Presas y Embalses. Introducción al estudio de presas y embalses.

https://www.researchgate.net/publication/326560488_Capitulo_1_Presas_y_Embalses

Satriani, S., Lopa, R., & Maricar, F. (2021, March). Storage capacity analysis of Nipa Nipa regulation pond using Ripple method. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1098, No. 2, p. 022054). IOP Publishing.

Schlef, K. E., Kunkel, K. E., Brown, C., Demissie, Y., Lettenmaier, D. P., Wagner, A., ... & Yan, E. (2022). Incorporating Non-Stationarity from Climate Change into Rainfall Frequency and Intensity-Duration-Frequency (IDF) Curves. *Journal of Hydrology*, 128757.

Seyboth, K. (2013). Intergovernmental panel on climate change (IPCC). *Encycl Energy Nat Res Environ Econ*.

Shiklomanov, I. A. (1991). The world's water resources. In *Proceedings of the international symposium to commemorate* (Vol. 25, pp. 93-126). Paris, France: Unesco.

Skertchly Molina, L. (1989). Métodos para calcular capacidades de embalse. http://repositorio.imta.mx/bitstream/handle/20.500.12013/1246/RIH_050.pdf?sequence=3&isAllowed=y

Soundharajan, B. S., Adeloye, A. J., & Remesan, R. (2016). Evaluating the variability in surface water reservoir planning characteristics during climate change impacts assessment. *Journal of Hydrology*, 538, 625-639.

Turner, S. W., Doering, K., & Voisin, N. (2020). Data-driven reservoir simulation in a large-scale hydrological and water resource model. *Water Resources Research*, 56(10), e2020WR027902.

UN Water (2020). Water Scarcity. Recuperado de <https://www.unwater.org/water-facts/scarcity/>

Velasco, Israel, Ochoa, Leonel, & Gutiérrez, Carlos. (2005). Sequía, un problema de perspectiva y gestión. *Región y sociedad*, 17(34), 35-71. Recuperado en 13 de marzo de 2023, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-39252005000300002&lng=es&tlng

Vicuña, S., McPhee, J., & Garreaud, R. D. (2012). Agriculture vulnerability to climate change in a snowmelt-driven basin in semiarid Chile. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 138(5), 431-441.

Yañez, E. (2022). Modelación de la respuesta hidrológica de cuencas de los Andes semiáridos de Chile (30° S) a escenarios de cambio climático. https://ebuah.uah.es/dspace/bitstream/handle/10017/52721/TFM_Yanez_SanFrancisco_2022.pdf?sequence=1&isAllowed=y

You, J. Y., & Cai, X. (2008). Hedging rule for reservoir operations: 1. A theoretical analysis. *Water Resources Research*, 44(1). <https://doi.org/10.1029/2006WR005481>

Zomer, R. J., Trabucco, A., Bossio, D. A., & Verchot, L. V. (2008). Climate change mitigation: A spatial analysis of global land suitability for clean development mechanism afforestation and reforestation. *Agriculture, ecosystems & environment*, 126(1-2), 67-80.

9. ANEXOS

Anexo A

Casos que presentan un cambio lineal en el valor de la media del caudal de entrada junto a una demanda constante.

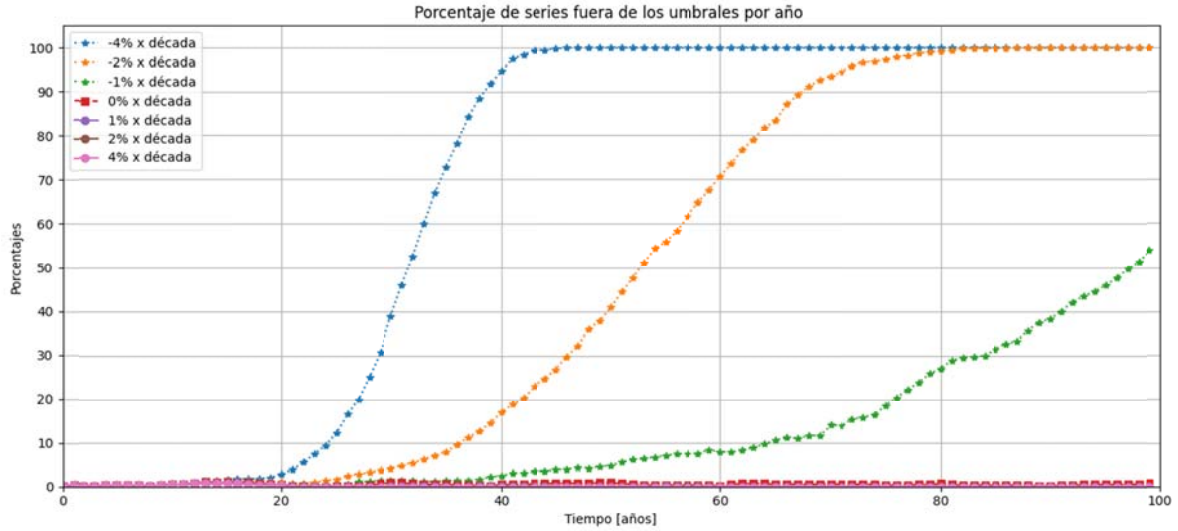


Figura 6: Porcentaje de series que superan los umbrales fijados por los percentiles 99,5 y 0,5 en escenarios con cambio en la media del caudal de entrada (demanda igual a $0,3398 \text{ [m}^3/\text{s}]$).

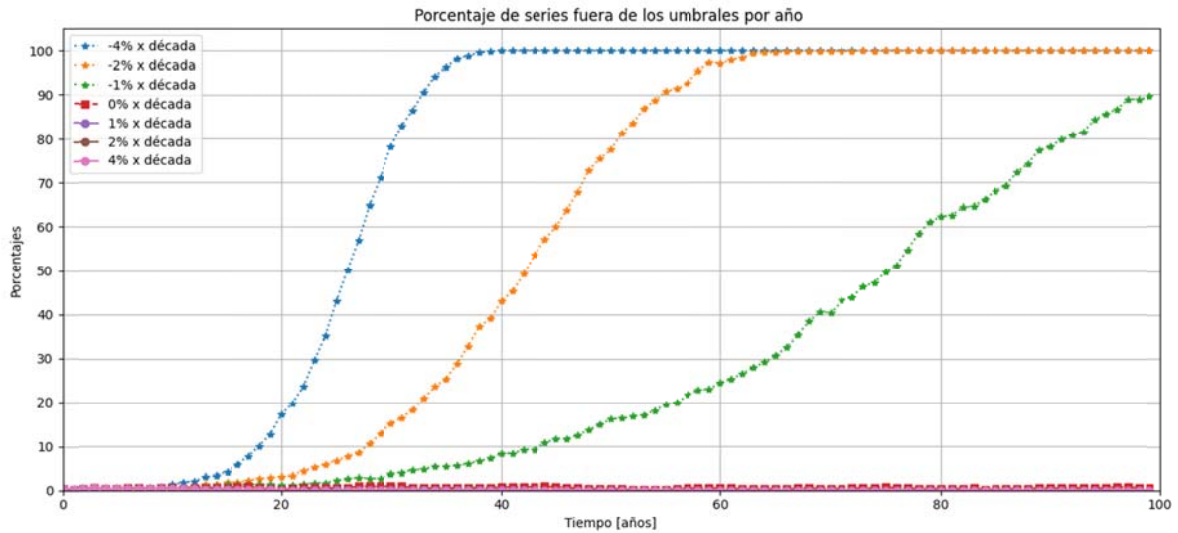


Figura 7: Porcentaje de series que superan los umbrales fijados por los percentiles 99,5 y 0,5 en escenarios con cambio en la media del caudal de entrada (demanda igual a $0,3823 \text{ [m}^3/\text{s}]$).

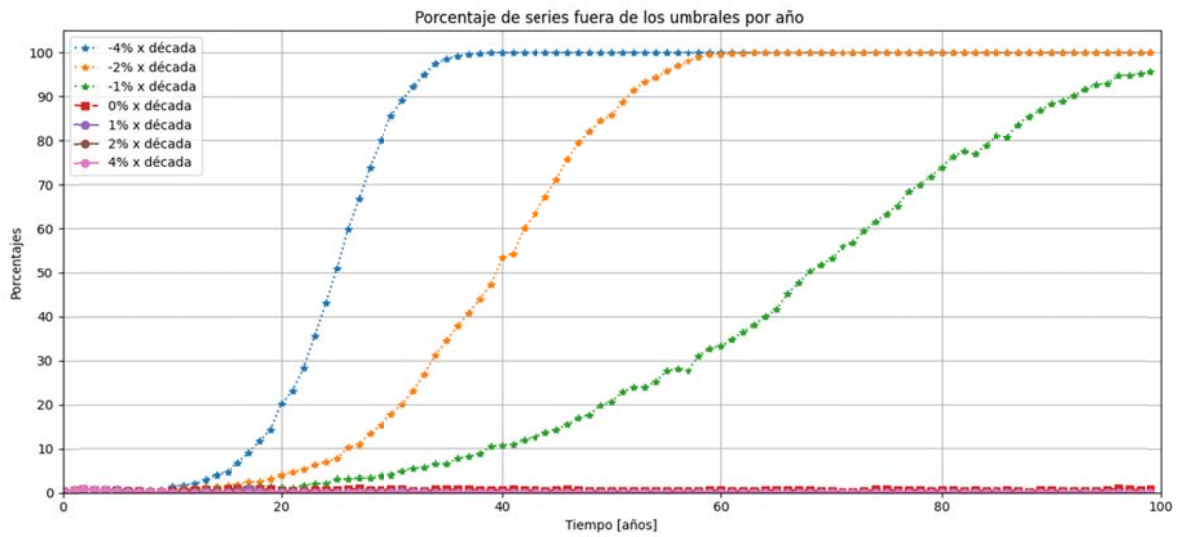


Figura 8: Porcentaje de series que superan los umbrales fijados por los percentiles 99,5 y 0,5 en escenarios con cambio en la media del caudal de entrada (demanda igual a 0,4248 [m³/s]).

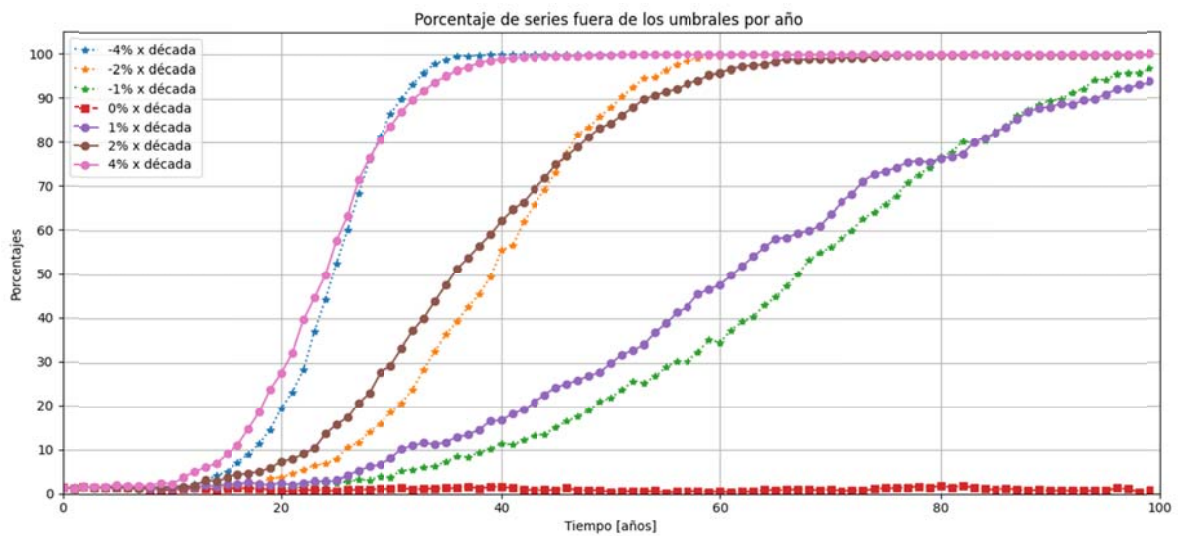


Figura 9: Porcentaje de series que superan los umbrales fijados por los percentiles 99,5 y 0,5 en escenarios con cambio en la media del caudal de entrada (demanda igual a 0,4673 [m³/s]).

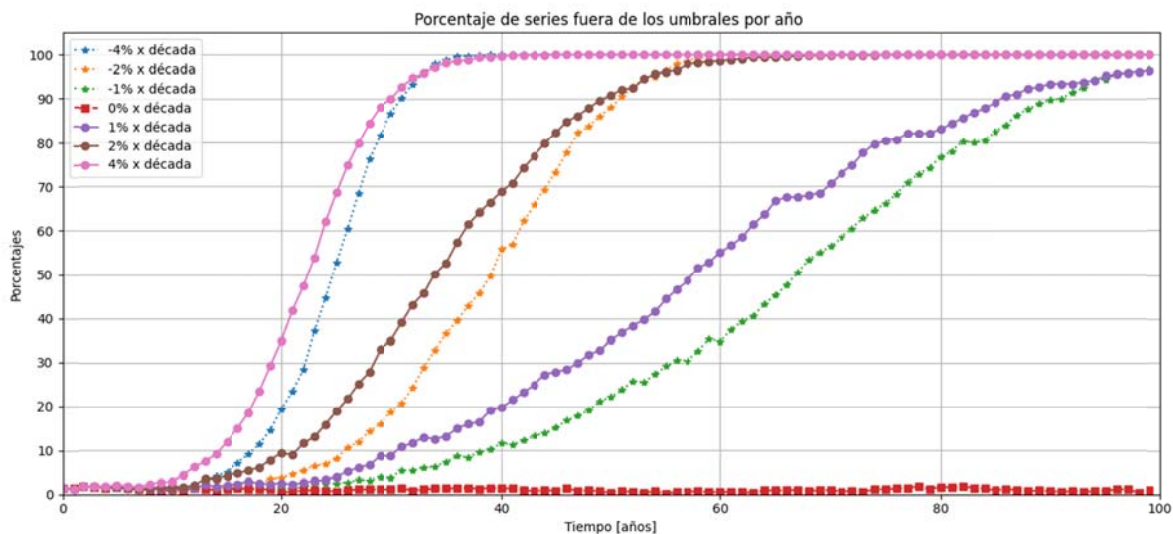


Figura 10: Porcentaje de series que superan los umbrales fijados por los percentiles 99,5 y 0,5 en escenarios con cambio en la media del caudal de entrada (demanda igual a $0,5098 \text{ [m}^3/\text{s)]}$.

Anexo B

Casos que presentan un cambio lineal en la desviación estándar del caudal de entrada junto a una demanda constante.

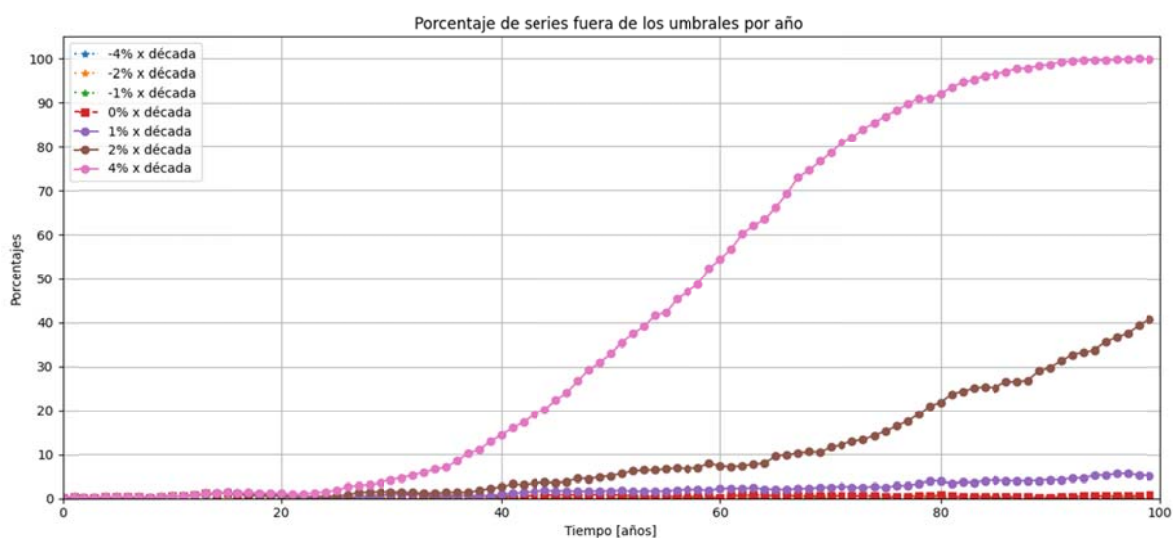


Figura 11: Porcentaje de series que superan los umbrales fijados por los percentiles 99,5 y 0,5 en escenarios con cambio en la desviación estándar del caudal de entrada (demanda igual a $0,3398 \text{ [m}^3/\text{s)]}$.

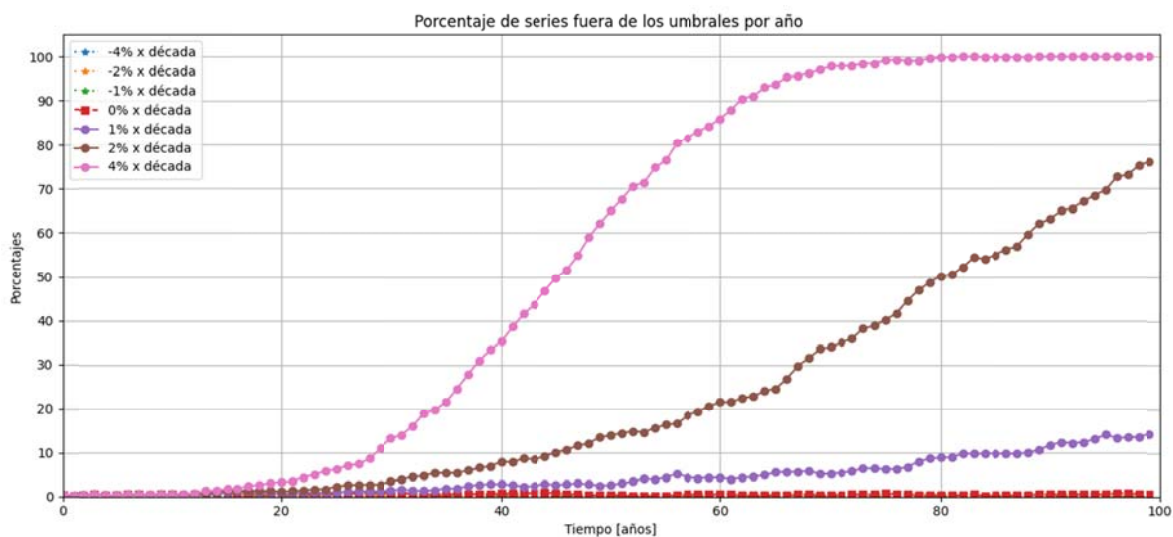


Figura 12: Porcentaje de series que superan los umbrales fijados por los percentiles 99,5 y 0,5 en escenarios con cambio en la desviación estándar del caudal de entrada (demanda igual a 0,3823 $[m^3/s]$).

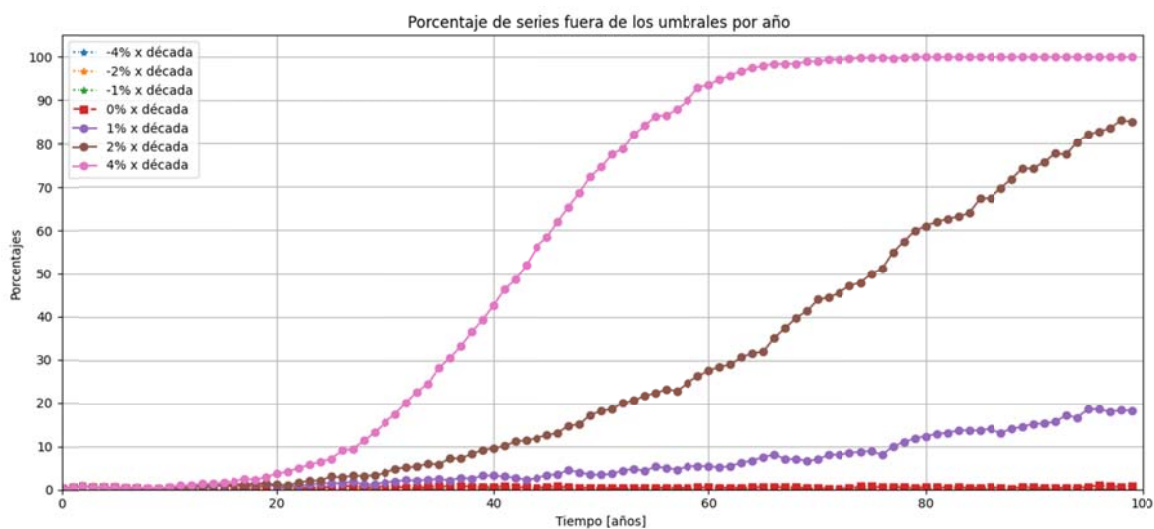


Figura 13: Porcentaje de series que superan los umbrales fijados por los percentiles 99,5 y 0,5 en escenarios con cambio en la desviación estándar del caudal de entrada (demanda igual a 0,4248 $[m^3/s]$).

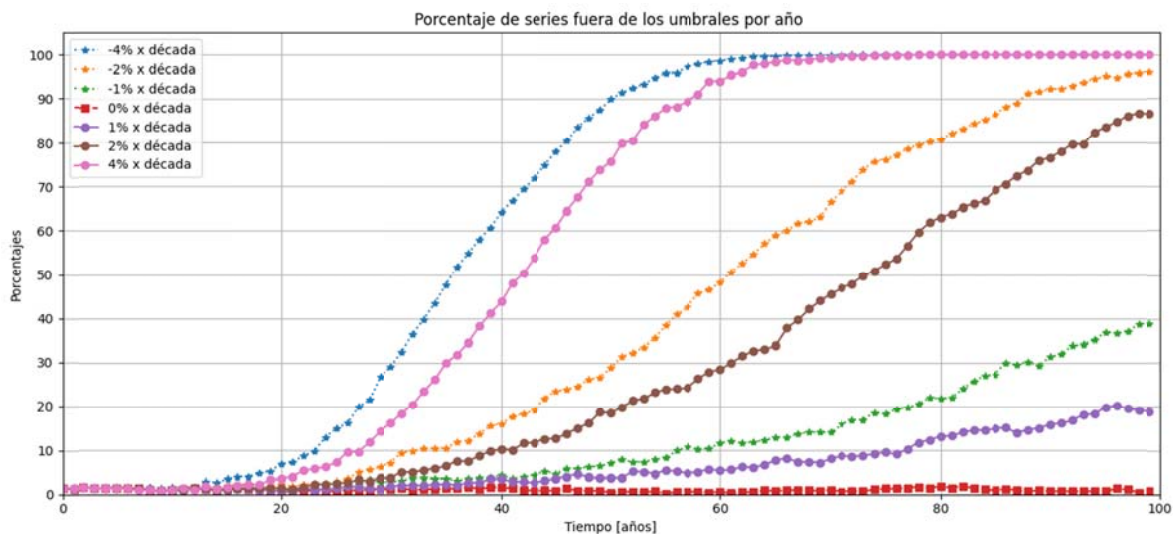


Figura 14: Porcentaje de series que superan los umbrales fijados por los percentiles 99,5 y 0,5 en escenarios con cambio en la desviación estándar del caudal de entrada (demanda igual a 0,4673 m^3/s).

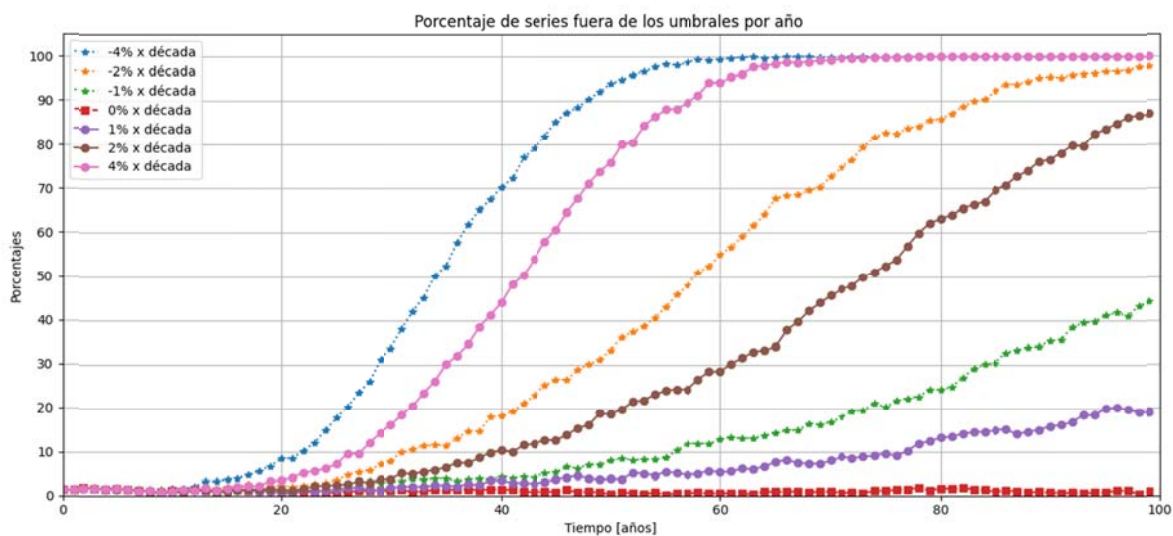


Figura 15: Porcentaje de series que superan los umbrales fijados por los percentiles 99,5 y 0,5 en escenarios con cambio en la desviación estándar del caudal de entrada (demanda igual a 0,5098 m^3/s).

Anexo C

Casos que presentan un cambio lineal en el valor de la media del caudal y en la desviación estándar del caudal de entrada junto a una demanda constante.

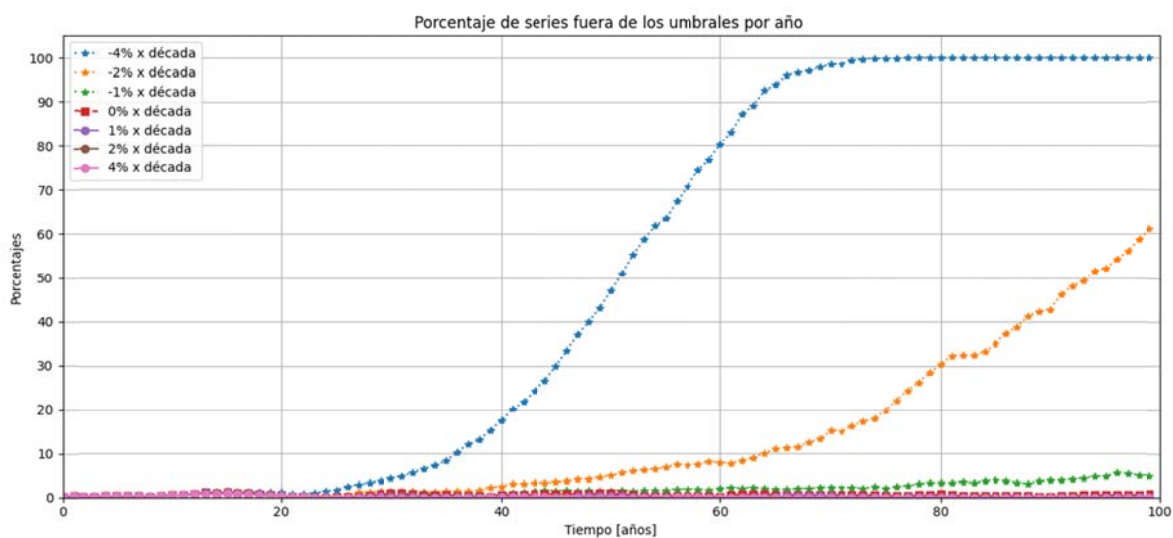


Figura 16: Porcentaje de series que superan los umbrales fijados por los percentiles 99,5 y 0,5 en escenarios con cambio en la media del caudal y desviación estándar del caudal de entrada (demanda igual a $0,3398 \text{ [m}^3/\text{s}]$).

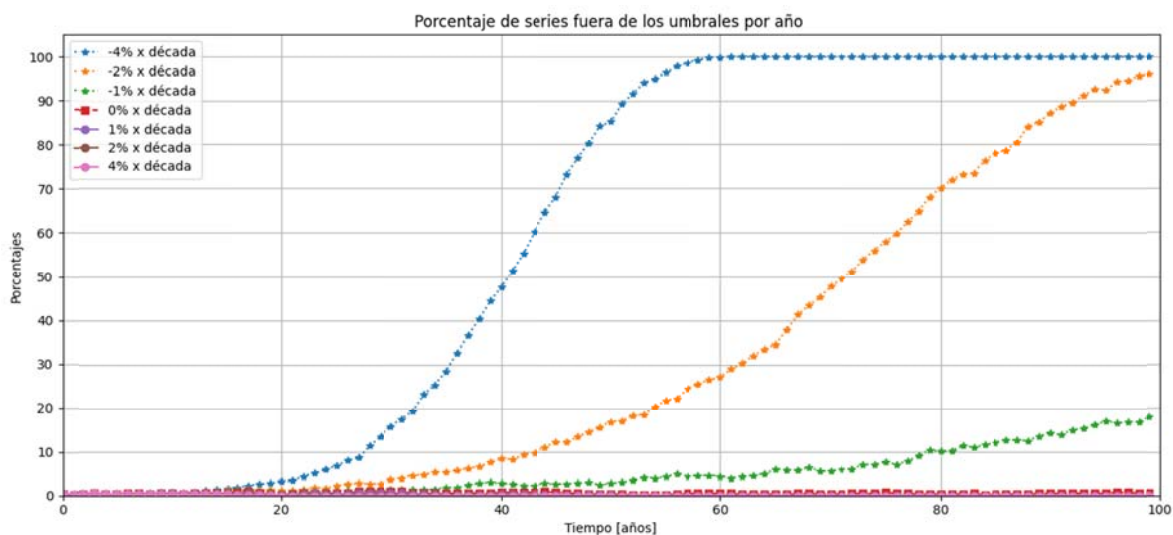


Figura 17: Porcentaje de series que superan los umbrales fijados por los percentiles 99,5 y 0,5 en escenarios con cambio en la media del caudal y desviación estándar del caudal de entrada (demanda igual a $0,3823 \text{ [m}^3/\text{s}]$).

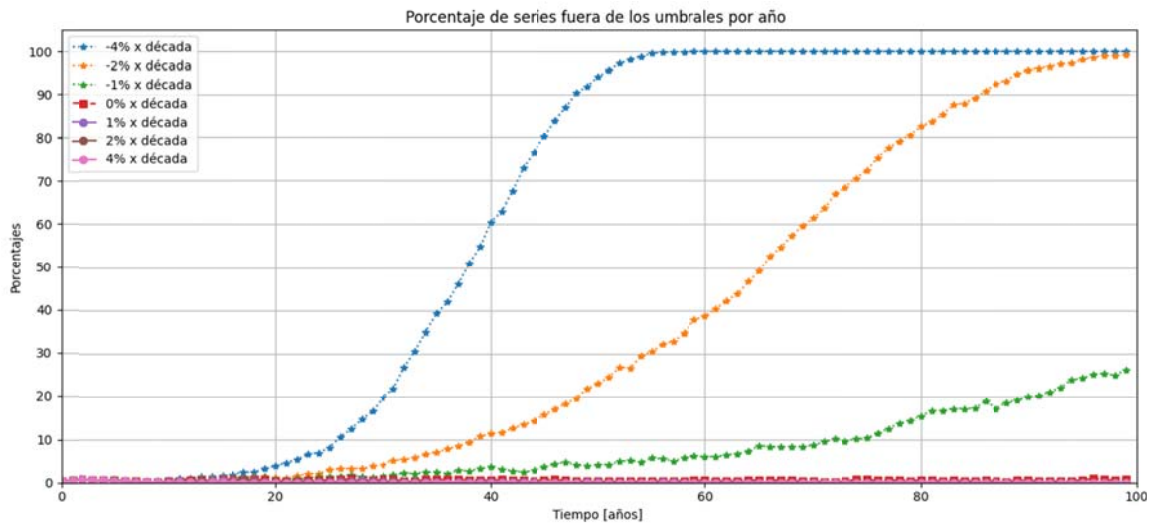


Figura 18: Porcentaje de series que superan los umbrales fijados por los percentiles 99,5 y 0,5 en escenarios con cambio en la media del caudal y desviación estándar del caudal de entrada (demanda igual a $0,4248 \text{ [m}^3/\text{s)]}$.

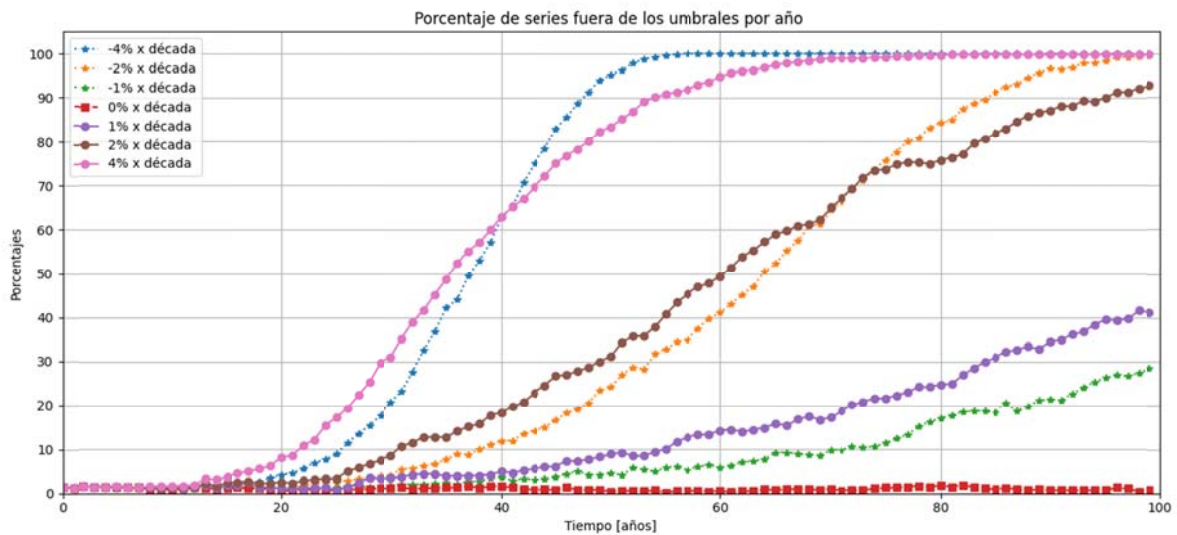


Figura 19: Porcentaje de series que superan los umbrales fijados por los percentiles 99,5 y 0,5 en escenarios con cambio en la media del caudal y desviación estándar del caudal de entrada (demanda igual a $0,4673 \text{ [m}^3/\text{s)]}$.

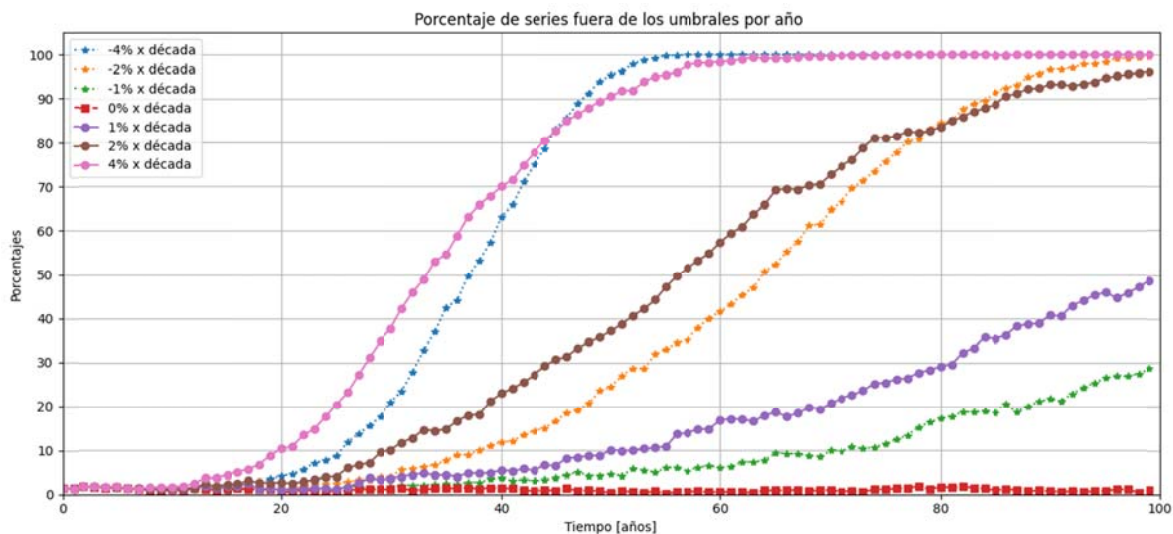


Figura 20: Porcentaje de series que superan los umbrales fijados por los percentiles 99,5 y 0,5 en escenarios con cambio en la media del caudal y desviación estándar del caudal de entrada (demanda igual a 0,5098 [m³/s]).

Anexo D

Casos que presentan un cambio lineal en el valor de la media del caudal de entrada junto a una demanda variable.

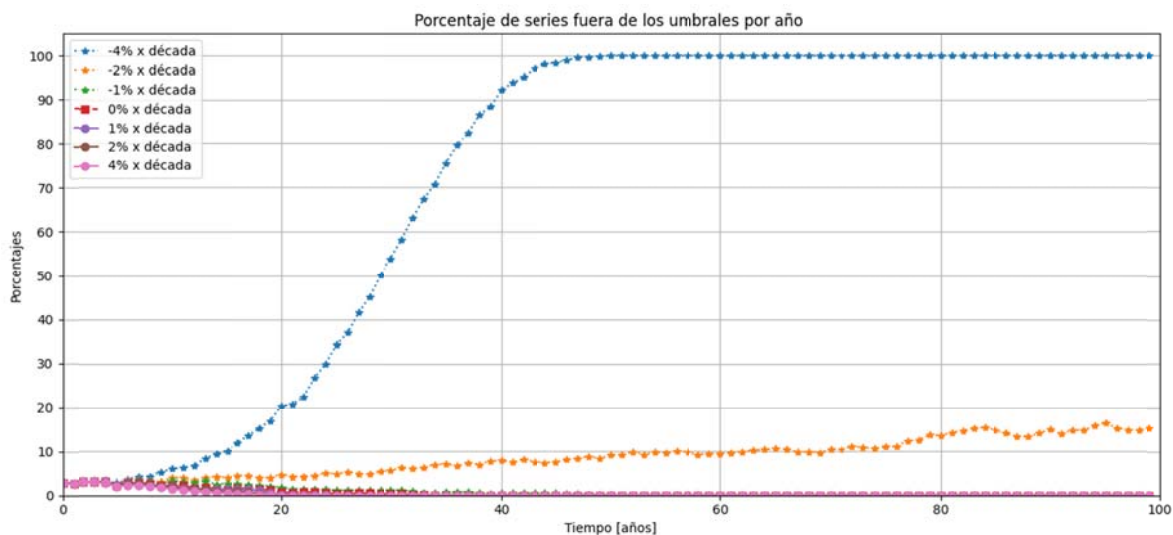


Figura 21: Porcentaje de series que superan los umbrales fijados por los percentiles 99,5 y 0,5 en escenarios con cambio en la media del caudal de entrada (demanda disminuye 3% por década).

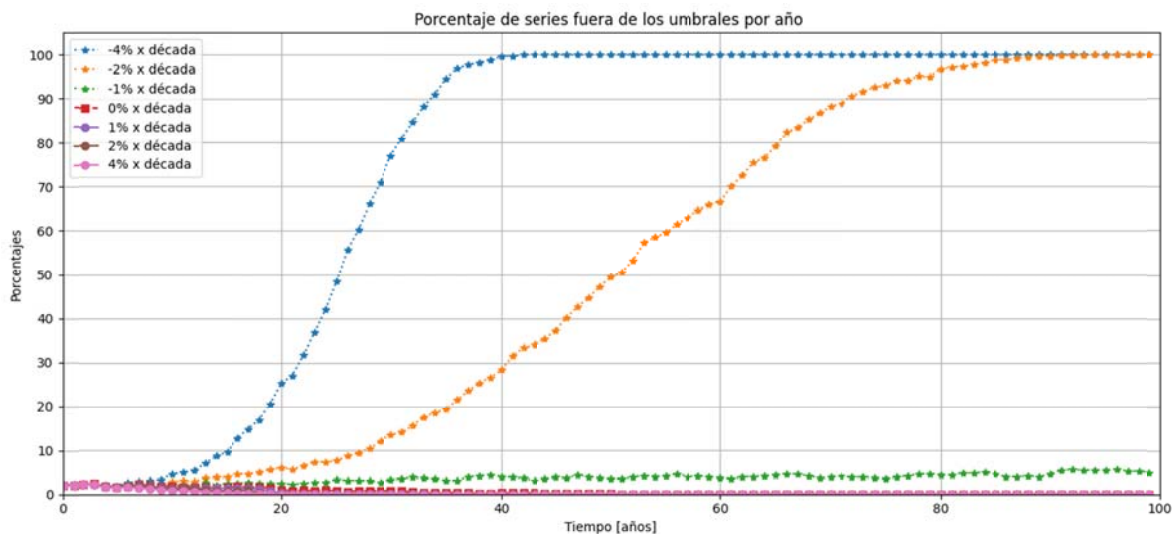


Figura 22: Porcentaje de series que superan los umbrales fijados por los percentiles 99,5 y 0,5 en escenarios con cambio en la media del caudal de entrada (demanda disminuye 1,5% por década).

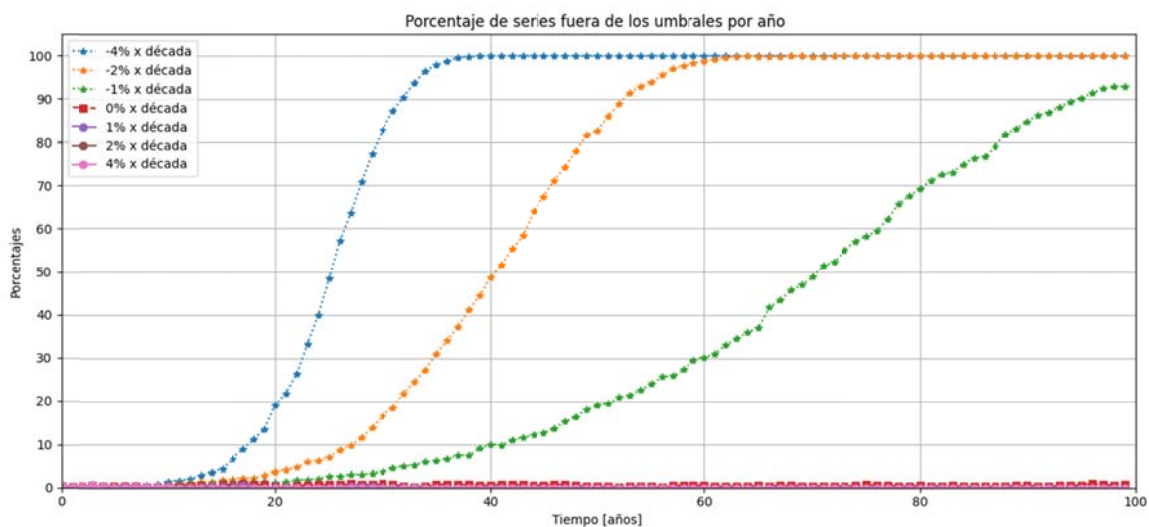


Figura 23: Porcentaje de series que superan los umbrales fijados por los percentiles 99,5 y 0,5 en escenarios con cambio en la media del caudal de entrada (demanda constante).

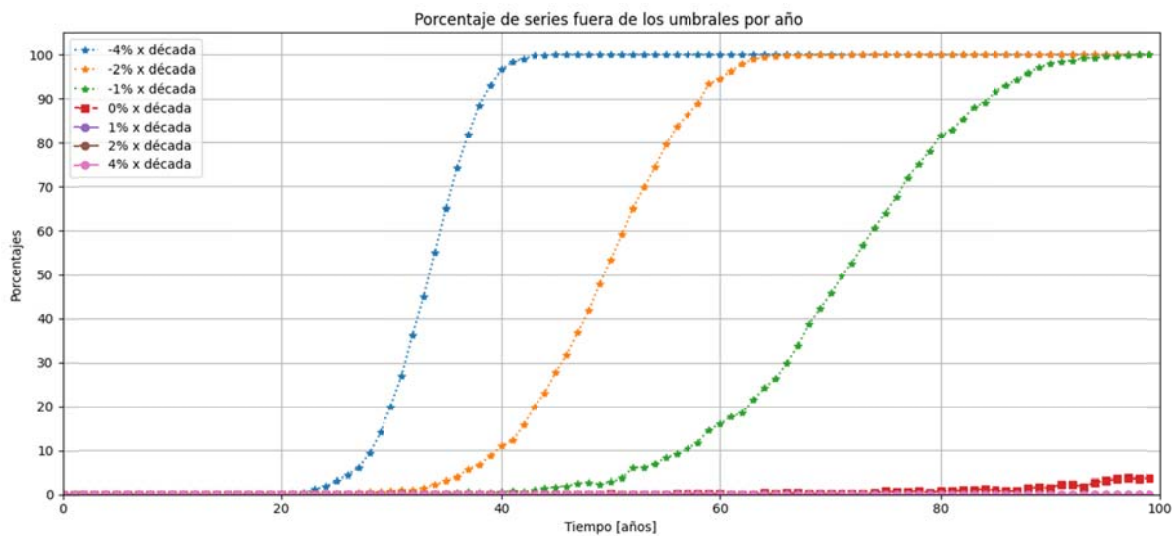


Figura 24: Porcentaje de series que superan los umbrales fijados por los percentiles 99,5 y 0,5 en escenarios con cambio en la media del caudal de entrada (demanda aumenta 1,5% por década).

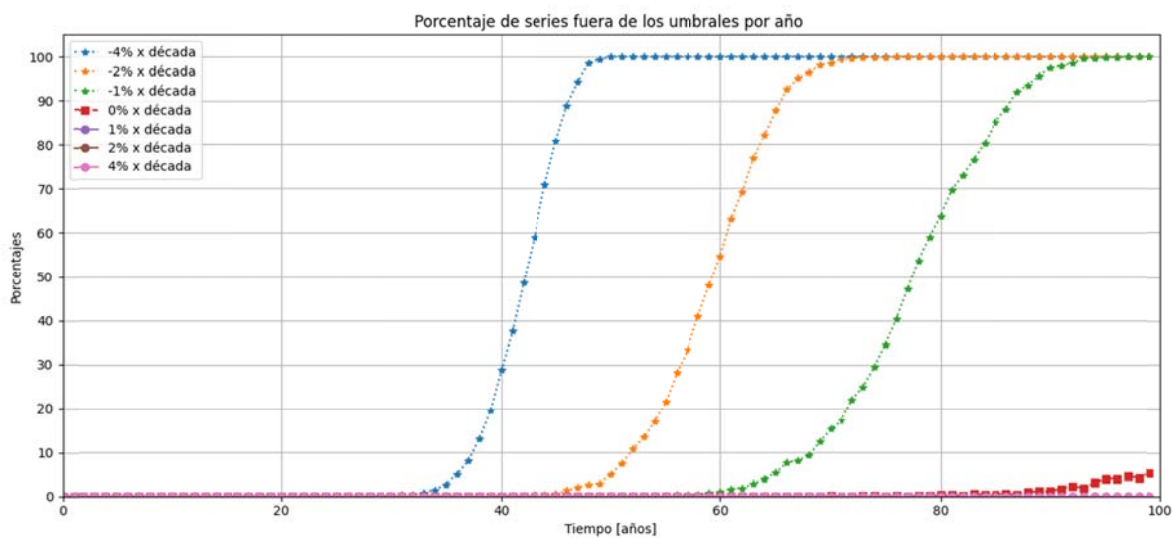


Figura 25: Porcentaje de series que superan los umbrales fijados por los percentiles 99,5 y 0,5 en escenarios con cambio en la media del caudal de entrada (demanda disminuye 3% por década).

Anexo E

Casos que presentan un cambio lineal en la desviación estándar del caudal de entrada junto a una demanda variable.

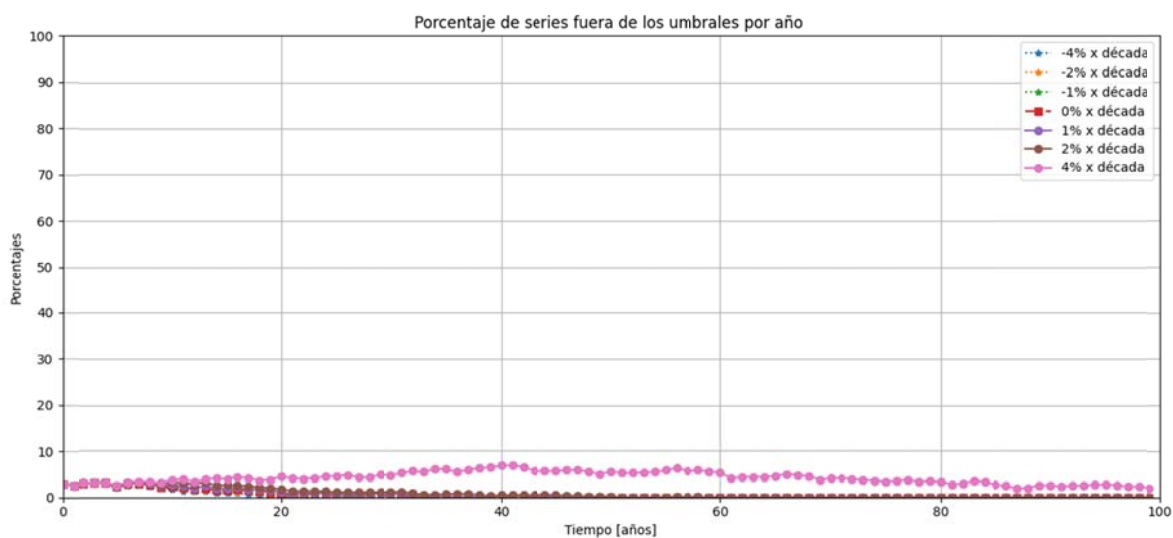


Figura 26: Porcentaje de series que superan los umbrales fijados por los percentiles 99,5 y 0,5 en escenarios con cambio en la desviación estándar del caudal de entrada (demanda disminuye 3% por década).

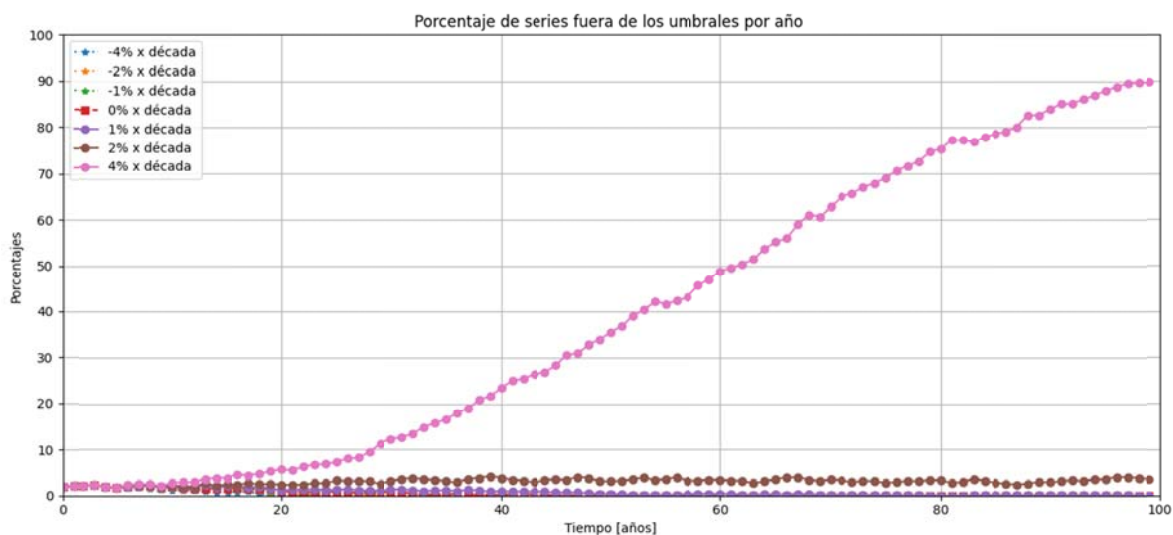


Figura 27: Porcentaje de series que superan los umbrales fijados por los percentiles 99,5 y 0,5 en escenarios con cambio en la desviación estándar del caudal de entrada (demanda disminuye 1,5% por década).

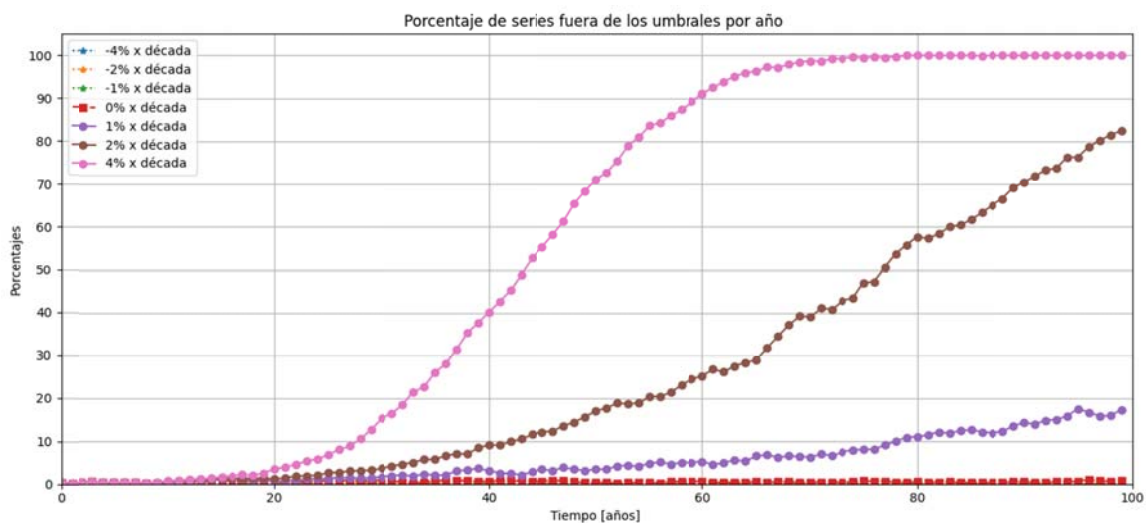


Figura 28: Porcentaje de series que superan los umbrales fijados por los percentiles 99,5 y 0,5 en escenarios con cambio en la desviación estándar del caudal de entrada (demanda constante).

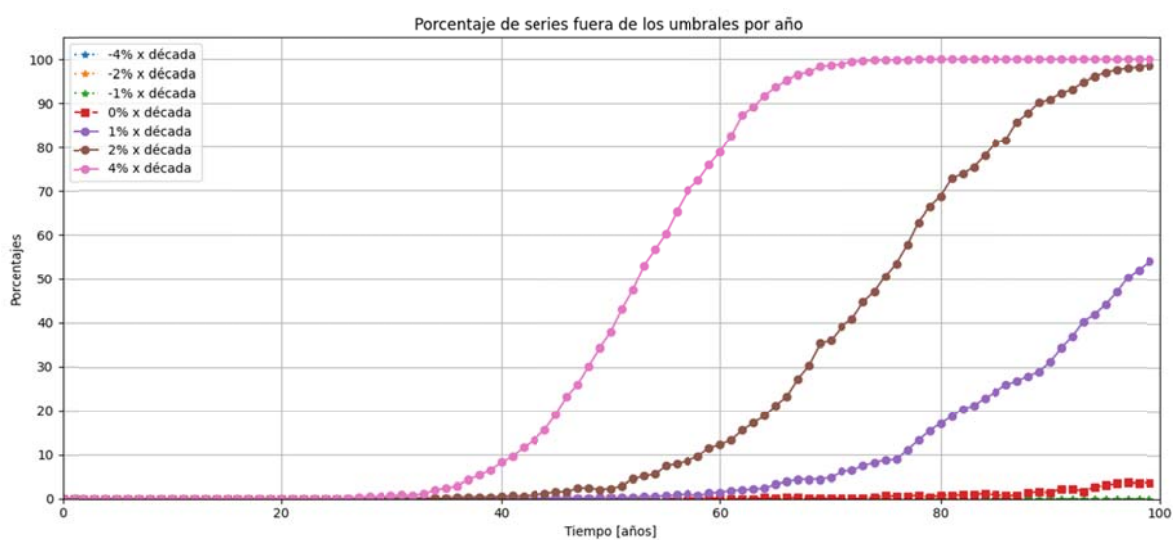


Figura 29: Porcentaje de series que superan los umbrales fijados por los percentiles 99,5 y 0,5 en escenarios con cambio en la desviación estándar del caudal de entrada (demanda aumenta 1,5% por década).

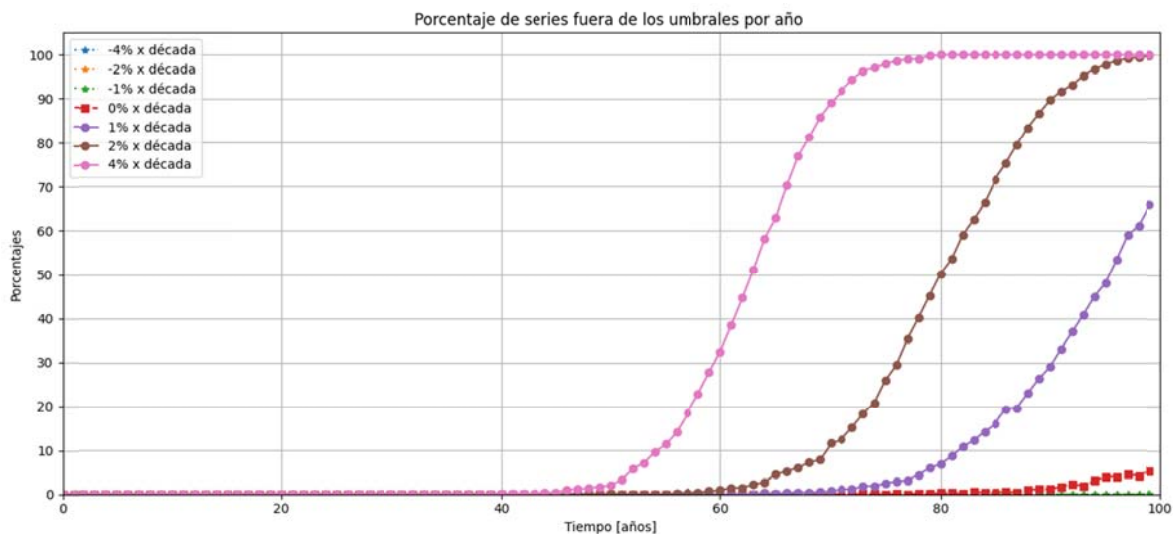


Figura 30: Porcentaje de series que superan los umbrales fijados por los percentiles 99,5 y 0,5 en escenarios con cambio en la desviación estándar del caudal de entrada (demanda disminuye 3% por década).

Anexo F

Casos que presentan un cambio lineal en el valor de la media y desviación estándar del caudal de entrada junto a una demanda variable.

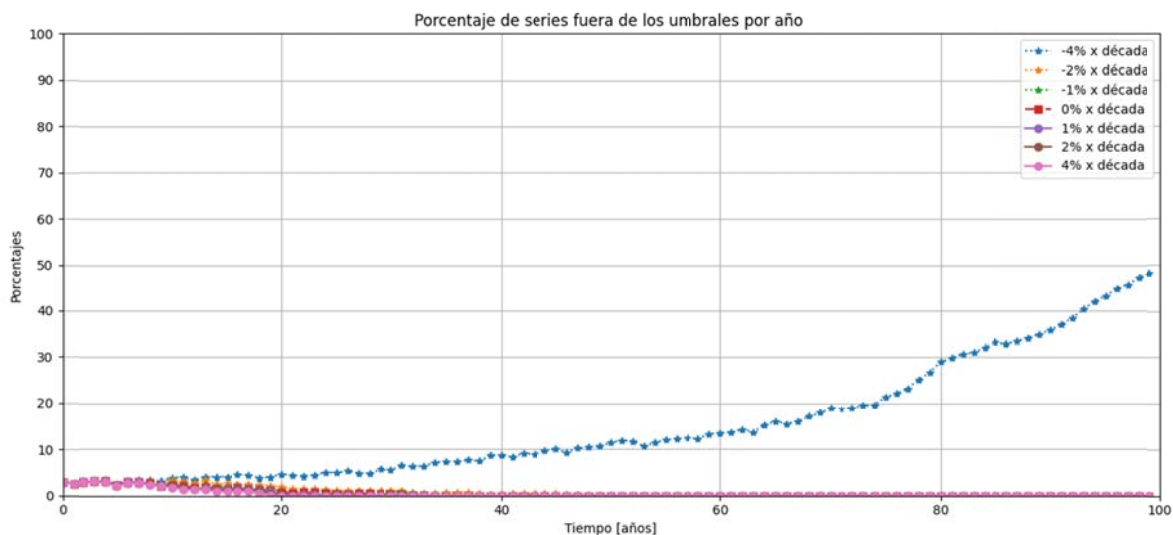


Figura 31: Porcentaje de series que superan los umbrales fijados por los percentiles 99,5 y 0,5 en escenarios con cambio en la media del caudal y desviación estándar del caudal de entrada (demanda disminuye 3% por década).

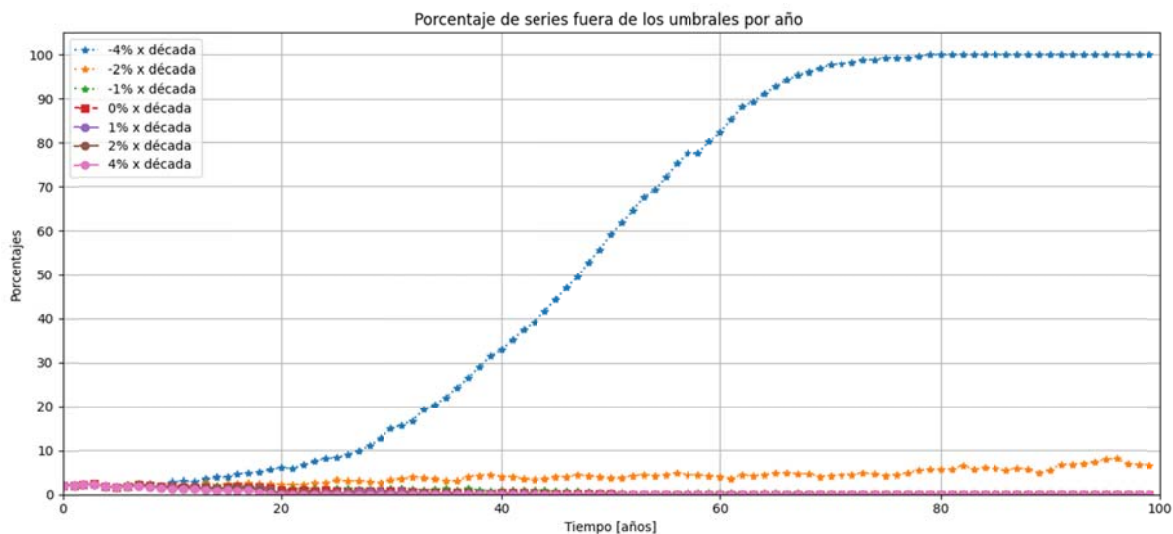


Figura 32: Porcentaje de series que superan los umbrales fijados por los percentiles 99,5 y 0,5 en escenarios con cambio en la media del caudal y desviación estándar del caudal de entrada (demanda disminuye 1,5% por década).

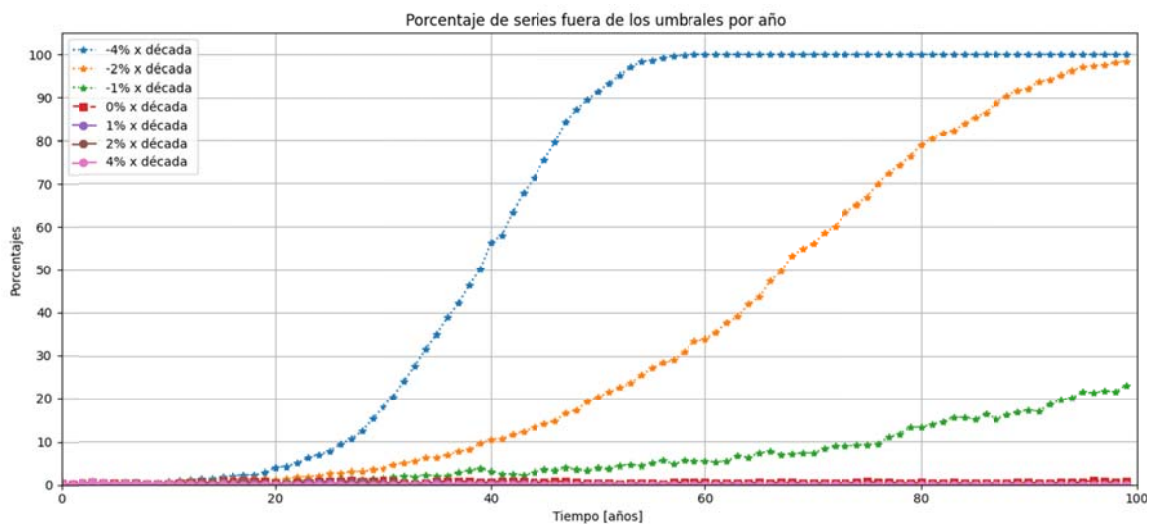


Figura 33: Porcentaje de series que superan los umbrales fijados por los percentiles 99,5 y 0,5 en escenarios con cambio en la media del caudal y desviación estándar del caudal de entrada (demanda constante).

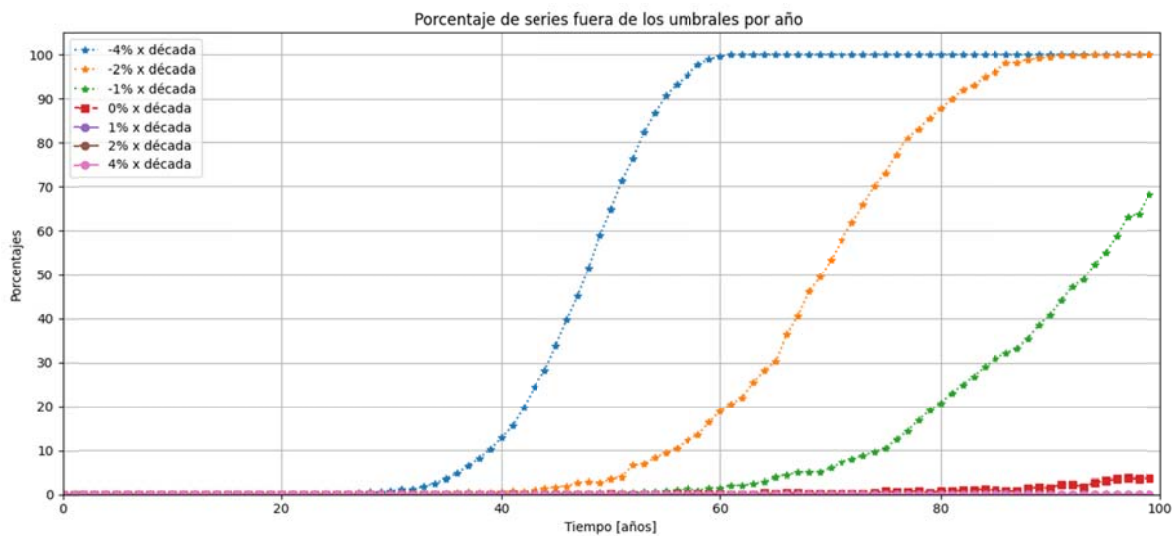


Figura 34: Porcentaje de series que superan los umbrales fijados por los percentiles 99,5 y 0,5 en escenarios con cambio en la media del caudal y desviación estándar del caudal de entrada (demanda aumenta 1,5% por década).

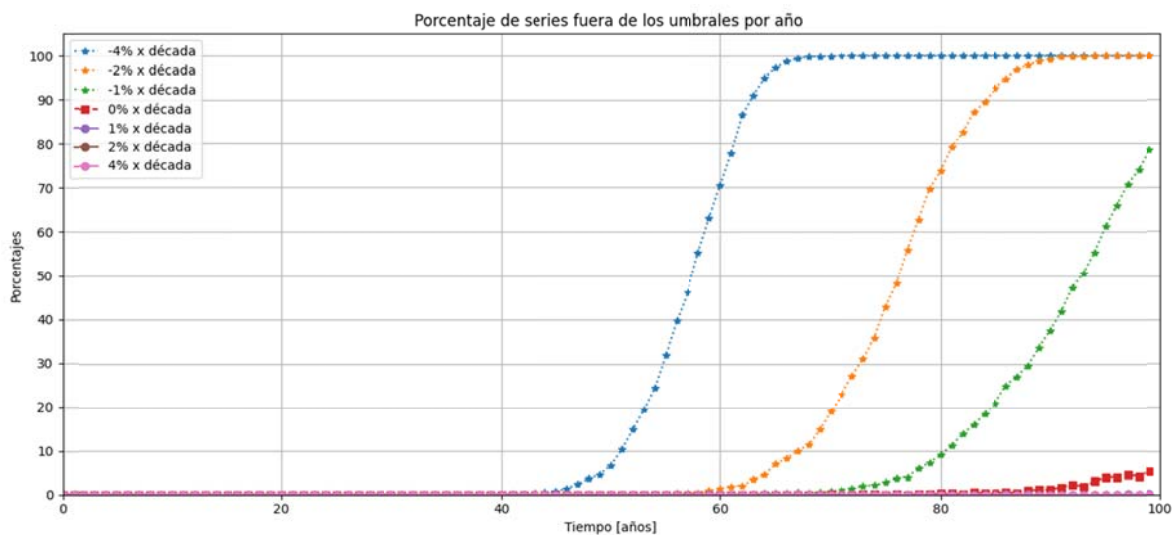


Figura 35: Porcentaje de series que superan los umbrales fijados por los percentiles 99,5 y 0,5 en escenarios con cambio en la media del caudal y desviación estándar del caudal de entrada (demanda disminuye 3% por década).