



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

**INCORPORACIÓN DE CONSIDERACIONES AMBIENTALES EN LA  
OPERACIÓN HORARIA DEL EMBALSE RAPEL**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**CARLA ALEJANDRA GUZMÁN ARCE**

PROFESOR GUÍA:

MARCELO OLIVARES ALVEAL

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

ALBERTO DE LA FUENTE STRANGER

RODRIGO PALMA BEHNKE

SANTIAGO-CHILE

ENERO 2013

## RESUMEN

Las centrales hidroeléctricas cubren aproximadamente un 44% de la potencia instalada del Sistema Interconectado Central (SIC), constituyendo una de las principales fuentes de generación eléctrica del país. La construcción y operación de centrales hidroeléctricas de embalse genera diversos impactos en los sistemas acuáticos. Dada la capacidad de regulación, el bajo costo de operación y la rápida respuesta que tienen frente a variaciones en la demanda energética, algunas de estas centrales presentan una operación concentrada en los horarios punta, o *hydropeaking*. Este tipo de operación genera alteraciones tanto en el régimen hidrológico como térmico aguas abajo. Este último efecto está relacionado con la operación sobre la estructura térmica del embalse.

El objetivo principal de este trabajo es estudiar la alteración hidrológica y térmica de corto plazo en el embalse Rapel asociada a operaciones de *hydropeaking*. Se consideran tanto el esquema actual de operación como escenarios de restricciones de caudales mínimos turbinados ( $Q_{\min}$ ) y fluctuaciones máximas horarias de caudal turbinado ( $\Delta Q_{\max}$ ). Los escenarios simulados se incorporaron a un modelo de pre despacho económico de carga, que resuelve el problema de coordinación hidrotérmica de corto plazo. A partir de este modelo se obtienen series temporales de caudales horarios que permiten calcular los Indicadores de Alteración Hidrológica Intradiaria (IAHI) y que a su vez son datos de entrada para el modelo numérico tridimensional que simula la hidrodinámica del embalse (CWR-ELCOM) y que permite determinar la estructura térmica del mismo. Los resultados del modelo CWR-ELCOM incluyen series de tiempo de las temperaturas del agua de salida del embalse, con las que se calculan Indicadores de Alteración Térmica Intradiaria (IATI). A partir de las series de tiempo horarias de caudales y temperaturas de salida se obtienen series diarias de IAHI e IATI, que luego dan lugar a curvas de duración.

Los resultados muestran que las restricciones a la operación, tanto al aplicarse cada una por sí sola como en forma combinada, inducen un desplazamiento en las curvas de duración hacia valores menores de los indicadores en comparación con la operación sin restricción. Para analizar el efecto de cada restricción por sí sola, se considera un periodo húmedo y uno seco, y en ambos se observa que mientras más limitada la operación, esto es mayores valores de  $Q_{\min}$  o menores de  $\Delta Q_{\max}$ , las curvas de duración se desplazan más hacia el eje de las ordenadas. Para el periodo seco es más efectivo aplicar restricciones de  $Q_{\min}$ , mientras que para el periodo húmedo resulta más efectivo limitar las fluctuaciones de caudales máximos horarios turbinados. Al combinar las restricciones se obtienen en todos los casos menores alteraciones que en el caso de aplicar restricciones por separado. Adicionalmente, se observa que en términos generales la restricción  $\Delta Q_{\max}$  es más efectiva que la de  $Q_{\min}$  en términos de las curvas de duración de los IAHI.

Los IATI siguen la misma tendencia que los IAHI, en donde los escenarios más restrictivos generan valores menores para los indicadores, con la diferencia que para los IATI las curvas de duración de los casos con restricciones, tanto por sí solas como combinadas, son similares a la obtenida del escenario sin restricciones. Adicionalmente, se observa que la restricción  $Q_{\min}$  es la más efectiva en términos de desplazar las curvas de duración con respecto a operación sin restricciones, llegando incluso para valores altos de caudal mínimo a no ser relevante considerar además restricciones de fluctuaciones máximas horarias de caudales.

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a mi familia por su amor, apoyo y compañía en todo momento. A mis papás por todo el esfuerzo que han hecho para darnos todo a mí y a mis hermanos, por toda la dedicación, confianza y preocupación que han mostrado siempre. Sin ustedes dos nada de esto hubiese sido posible. A la Tagua, por ser mi confidente y mi amiga, por escucharme y reírnos, por darme dos sobrinos hermosos y por ser un ejemplo para mí desde que era pequeña. Al Pelao y al Simón por hacer de todos los días uno diferente, por hacerme reír, molestarme y soportarme, gracias por todos los recuerdos llenos de alegrías, por su apoyo y sus muestras de cariño y aunque ya me hayan dejado chica hace rato para mí siempre van a ser mis hermanos que tengo que proteger y de los que voy a estar orgullosa siempre. Simplemente los amo.

Agradecer a mis abuelos, tíos y primos que siempre han estado presentes en cada uno de mis logros, por sus muestras de cariño y por la felicidad que sienten por cada etapa que se va cumpliendo de mi vida. Al Tata y a la Lala decirles que finalmente su Carlita es ingeniera.

No puedo dejar de agradecer a la Universidad de Chile, por la calidad de sus profesores y alumnos, en particular al Departamento de Ingeniería Civil que fue mi segunda casa estos últimos años. Gracias a los profesores que formaron parte de mi comisión; Marcelo Olivares, Alberto de la Fuente y Rodrigo Palma y al CE-FCFM por el tiempo y la colaboración prestada para el desarrollo de este trabajo. Agradezco en particular al profesor Marcelo Olivares por la preocupación y la buena disposición durante todos estos meses. Agradezco también al proyecto Fondecyt N° 11110326 por permitir la realización de este proyecto. Y a mis compañeros cuyos trabajos y experiencias fueron parte fundamental para poder finalizar esta etapa, a Mauricio Fernández, Germán Ibarra y en especial a la Vale Rossel, por su disposición para ayudarme y solucionar los problemas.

Finalmente agradezco a mis amigos del colegio, la Enana, la Cata, la Mané, el Diegui, el Tomy y el Nico por estar siempre que los he necesitado, por entender las veces en las que el estudio no me dejaba verlos o cuando los cambiaba por la gente de la U, simplemente gracias por no dejar que el tiempo nos separe. Gracias también a todos los que me acompañaron durante plan común, con los que compartí jornadas de estudios y terrazas con risas infinitas, en especial con los que seguimos el camino de Civil, la Bego, Tomás, Pancho y Carlitos, gracias por las conversaciones, nuestros viajes, las jornadas de estudio, las peleas y su apoyo durante estos siete años. Y por último a los hidráulicos con los que reímos y sufrimos al final de este desafío, por las conversaciones que no nos dejaban avanzar, gracias por sus consejos, paciencia y amistad, en especial a la Dani y a Lapi por todas las risas e incoherencias que hicieron tan agradables los días en la pecera.

Cierro esta etapa muy orgullosa, tranquila y feliz.

# INCORPORACIÓN DE CONSIDERACIONES AMBIENTALES EN LA OPERACIÓN DEL EMBALSE RAPEL

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCION.....</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación.....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.2.1. Objetivo General.....	2
1.2.2. Objetivos Específicos.....	2
<b>2. ANTECEDENTES.....</b>	<b>3</b>
2.1. Alteraciones Régimen Hidrológico.....	3
2.2. Indicadores de Alteración Hidrológica Intradiarios (IAHI).....	4
2.3. Alteraciones del Régimen Térmico.....	5
2.4. Coordinación Hidrotérmica (CHT).....	6
2.5. Modelos de Despacho.....	8
2.5.1. Modelos SEEDS y MIPUC.....	9
2.6. Modelo Numérico CWR-ELCOM.....	10
2.7. Interacción entre el Modelo de Operación y el Modelo Hidrodinámico.....	11
<b>3. DESCRIPCIÓN Y OPERACIÓN DEL EMBALSE RAPEL.....</b>	<b>13</b>
3.1. Descripción del Embalse Rapel.....	13
3.1.1. Ubicación.....	13
3.1.2. Características Generales de la Cuenca.....	14
3.1.3. Características Principales del Embalse Rapel.....	14
3.1.4. Temperatura en el Embalse.....	15
3.2. Operación Central Rapel.....	16
3.2.1. Series de Tiempo de Caudal Horario.....	16
3.3. Operación Real y Programada.....	22
3.3.1. Indicadores de Alteración Hidrológica.....	22
<b>4. RESTRICCIONES AMBIENTALES A LA OPERACIÓN.....</b>	<b>24</b>
4.1. Periodo de Aplicación de las Restricciones.....	24
4.2. Caudal Mínimo de Operación (Q <sub>mín</sub> ).....	25
4.3. Fluctuación Máxima Horaria de Operación ( $\Delta Q_{\text{máx}}$ ).....	27
4.4. Caudal Mínimo y Fluctuación Máxima Horaria de Operación.....	29
4.5. Aplicación del Modelo MIPUC.....	29

<b>5. ALTERACIÓN RÉGIMEN HIDROLÓGICO .....</b>	<b>31</b>
5.1. Indicadores de Alteración Hidrológica Intradiarias (IAHI).....	31
5.1.1. Restricción Caudal Mínimo (Q <sub>mín</sub> ).....	31
5.1.2. Restricción Fluctuación Máxima Horaria de Operación ( $\Delta Q_{\text{máx}}$ ) .....	36
5.1.3. Restricción Caudal Mínimo y Restricción Fluctuación Máxima Horaria de Operación .....	40
5.2. Volumen asociado al caudal turbinado .....	46
<b>6. ALTERACIÓN RÉGIMEN TÉRMICO INTRADIARIO.....</b>	<b>48</b>
6.1. Indicadores de Alteración Térmica Intradiarios (IATI).....	48
6.2. Temperatura del Agua de Salida del Embalse .....	49
6.2.1. Escenario Base.....	50
6.3. Resultados Indicadores de Alteración Régimen Térmico Intradiario.....	51
6.3.1. Restricción Caudal Mínimo de Operación (Q <sub>mín</sub> ).....	52
6.3.2. Restricción Fluctuación Máxima Horaria de Operación ( $\Delta Q_{\text{máx}}$ ) .....	54
6.3.3. Restricción Caudal Mínimo y Fluctuación Máxima Horaria de Operación ...	56
<b>7. ANÁLISIS Y CONCLUSIONES .....</b>	<b>67</b>
7.1. Análisis Multiobjetivo .....	67
7.2. Conclusiones .....	68
7.2.1. Limitaciones y Trabajos Futuros .....	70
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>72</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>I</b>
<b>ANEXO A: INDICADORES DE ALTERACIÓN HIDROLÓGICA INTRADIARIOS OPERACIÓN REAL Y PROGRAMADA CDEC-SIC.....</b>	<b>II</b>
<b>ANEXO B: INDICADORES DE ALTERACIÓN HIDROLÓGICA INTRADIARIOS .....</b>	<b>IV</b>
<b>PERIODO ANUAL .....</b>	<b>XI</b>
<b>ANEXO C: INDICADORES DE ALTERACIÓN TÉRMICA INTRADIARIA .....</b>	<b>XV</b>
<b>ANEXO D: ANÁLISIS MULTI OBJETIVO .....</b>	<b>XXIX</b>

# 1. INTRODUCCION

## 1.1. Motivación

En Chile las centrales hidroeléctricas generan aproximadamente un 44% de la potencia instalada en el Sistema Interconectado Central (SIC), que abastece a casi el 93% de la población del país.

Las centrales hidroeléctricas al no usar combustible para la generación de energía se consideran como una forma de producción con un bajo costo de operación asociado. Estas pueden ser de pasada o de embalse, teniendo estas últimas la capacidad de regular y almacenar un volumen de agua, así como de responder rápidamente a las fluctuaciones de demandas que se producen en un día. Estas dos características permiten que algunas centrales operen principalmente para satisfacer los *peaks* de demanda energética, pasando de una generación nula o muy baja a valores altos de potencia en periodos cortos de tiempo (horas). Este tipo de operación se denomina *hydropeaking*, situación representativa de como operan algunas centrales del SIC.

La programación del uso de energía hidroeléctrica tiene diferentes periodos de evaluación, los que pueden ser horarios, diarios, semanales o mensuales en donde para cada uno de los intervalos de tiempo existe una alteración hidrológica asociada. En el mayor sistema interconectado de Chile el encargado de determinar qué centrales operan o no para satisfacer la demanda energética es el Centro de Despacho Económico de Carga del Sistema Interconectado Central (CDEC-SIC) cuyo criterio de operación consiste en minimizar los costos esperados (operación y fallas) mediante una optimización del uso de energía térmica e hidráulica (coordinación hidrotérmica), a través de la cual se determina qué tipo de energía y qué centrales deben operar de manera de utilizar eficientemente el recurso hídrico, minimizar los costos de operación y satisfacer la demanda energética.

La operación de centrales hidráulicas de embalse genera diferentes impactos debido a su construcción y operación. Producto de la construcción se cambia el régimen hidrológico natural del río, se tienen mayores tiempos de retención, se crea una barrera que impide el paso de nutrientes y sedimentos alterando así las características físico-químicas del agua. Según la operación de la central se observan efectos en el punto de restitución de las aguas, aguas debajo de la central, en donde no se tiene un caudal constante en el tiempo, se erosionan las zonas ribereñas, se altera la composición físico-química del agua y se limitan posibles usos del agua.

Aguas arriba de la presa, en la zona del embalse específicamente se pueden observar fenómenos de estratificación en ciertos periodos del año y una mayor exposición a factores como el viento e intercambios de calor con la atmósfera, lo que implica que las temperaturas a la salida de la presa, no sean las mismas que las que las temperaturas de entrada, alterando aguas abajo el régimen térmico del río. Este efecto trae consigo cambios en la concentración de gases disueltos y nutrientes, afectando directamente las condiciones necesarias para el desarrollo de los diferentes ecosistemas.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo General**

La presente memoria tiene como objetivo principal evaluar el grado de alteración hidrológica y térmica del embalse Rapel, tanto para la situación actual como bajo escenarios con restricciones ambientales a la operación.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

Los objetivos específicos son los siguientes:

- Modelar la operación del embalse Rapel bajo escenarios con restricciones ambientales.
- Elaboración de un diagnóstico del grado de alteración hidrológica y del régimen térmico intradiario por operaciones del embalse Rapel.
- Comparar el comportamiento hidrológico y térmico del escenario actual con los escenarios con restricciones ambientales.

## 2. ANTECEDENTES

Cada vez se hace más relevante evaluar y mitigar las alteraciones producidas por la construcción y operación de las centrales hidroeléctricas de embalse. La construcción de las centrales de embalse altera el estado natural de un río, genera aguas arriba de la presa, la acumulación de sedimentos, el bloqueo en el paso de nutrientes y cambios en la temperatura con respecto al estado natural. Este último es uno de los factores relevantes para el desarrollo de sistemas acuáticos y calidad del agua, ya que condiciona la presencia y distribución de especies, la concentración de saturación de gases disueltos y la velocidad de reacciones químicas (Caissie, 2006).

Dadas las características de operación de las centrales hidráulicas, su rápida capacidad de responder a las fluctuaciones y aumentos de la demanda energética y que son una fuente de generación de costos casi despreciables de operación, muchas de las centrales hidráulicas operan sólo para satisfacer los *peaks* de demandas generados en cortos periodos de tiempo, generando así caudales fluctuantes aguas abajo del punto de restitución de la central (operación *hydropeaking*) dado que la potencia generada está directamente relacionada con el caudal turbinado.

Los efectos intradiarios generados al operar una central en diferentes condiciones, pueden ser medidos mediante el uso de indicadores de alteración tanto hidrológicos como térmicos, los que permiten comparar diferentes escenarios y establecer cual es mejor o peor con respecto a otro en términos de la alteración generada.

### 2.1. Alteraciones Régimen Hidrológico

El régimen hidrológico de un río se ve claramente afectado producto de la construcción de centrales con capacidad de regulación, esto se evidencia aguas abajo del punto donde se restituyen las aguas, donde se aprecia que el caudal se ve sometido a alteraciones en comparación con el caudal existente previo a la construcción de la central. Las alteraciones en el régimen hidrológico intradiario se pueden producir por aumentos o disminuciones repentinas de caudal, generando impactos en los ecosistemas existentes (Moog, 1993).

La operación fluctuante y por ende el caudal fluctuante que se tiene aguas abajo del punto de restitución de la central, genera alteraciones en la calidad de los suelos aguas abajo (Ritcher, 1996), no permite tener un flujo constante aprovechable bajo el punto de restitución teniendo así usos limitados para el agua (Ritcher, 1997). Produce cambios en la temperatura del agua, en su composición química (García, 2011) y en parámetros físicos como la densidad, alterando así la calidad de las aguas y cambiando sus posibles usos dadas sus características.

La alteración hidrológica se puede apreciar en diferentes escalas de tiempo, ya sean diarias, semanales, estacionales o anuales. En este trabajo, dado que se quiere reflejar el efecto producto de la operación horaria del embalse Rapel, se evaluará la alteración de corto plazo inducida por la operación fluctuante de la central.

## 2.2. Indicadores de Alteración Hidrológica Intradiarios (IAHI)

Una forma de medir la alteración hidrológica producto de la operación de centrales es mediante el uso de indicadores de alteración hidrológica, los que permiten comparar diferentes escenarios de operación. Para efectos de este trabajo se analizará un escenario actual correspondiente a la operación de la central Rapel sin restricciones y se comparará con escenarios ficticios en los que se le aplicarán restricciones a la operación enfocadas en disminuir la alteración hidrológica intradiaria.

Para poder comparar los diferentes escenarios se utilizarán indicadores capaces de reflejar los efectos de la operación diaria de la central, razón por la cual se utilizarán los indicadores de alteración hidrológica intradiaria propuestos por Zimmerman et al., (2010):

### - Richards-Baker (R-B)

Corresponde a la suma absoluta de las fluctuaciones diarias dividido por la suma de los caudales totales de un día. Se trabaja con los 24 datos diarios de caudal. (Baker, et al., 2004).

$$R - B = \frac{\sum_{i=1}^{24} 0.5(|q_{i+1} - q_i| + |q_i - q_{i-1}|)}{\sum_{i=1}^{24} q_i} \quad \text{Ec. 1}$$

Este indicador representa la variación del flujo relativo al flujo total, en donde para operaciones que son constantes dentro de un día, el valor asociado a este indicador es 0, producto de que no existen fluctuaciones entre horas consecutivas.

### - Rango Total del Flujo (RTF)

Este indicador caracteriza la diferencia entre el caudal máximo y mínimo horario sobre la suma de todos los caudales diarios. (Lundquist and Cayan, 2002).

$$RTF = \frac{q_{max} - q_{min}}{\sum_{i=1}^{24} q_i} \quad \text{Ec. 2}$$

Al igual que para el indicador anterior, para operaciones constantes dentro de un día este indicador toma valores nulos y llega a un máximo de 1 para los casos en donde la central sólo opera una hora del día a un cierto valor.

- Coeficiente de Variación (CDV)

Este indicador corresponde al valor de la desviación estándar en un día dividido sobre el caudal promedio diario (McKinney, et al, 2001).

Mientras mayor es el valor del indicador CDV, mayores diferencias se tienen en la operación dentro de un día. Valores del indicador iguales a cero están asociados a operaciones que se mantienen constantes, por lo que no presentan una dispersión con respecto al valor promedio y valores mayores que 1 del indicador están asociados a diferencias mayores en la operación entre horas consecutivas.

$$CDV = \frac{\sigma}{\frac{\sum_{i=1}^{24} q_i}{24}} \quad \text{Ec. 3}$$

Dado que los indicadores son intradiarios se tiene un valor para cada uno de ellos por día, por lo que a partir de una serie de tiempo de varios días de duración se obtiene una muestra de cada indicador. A partir de dicha muestra es posible inferir la distribución empírica del indicador para cada escenario simulado.

### **2.3. Alteraciones del Régimen Térmico**

La temperatura del agua es uno de los parámetros determinantes para el desarrollo de ecosistemas acuáticos, dado que influencia la velocidad de crecimiento de organismos y su distribución, permite el desarrollo de ciertas especies dentro de determinados rangos de temperatura, condiciona la concentración de gases disueltos (Caissie, 2006), altera las propiedades físico-químicas del agua (Martínez, 2010), genera condiciones de mezcla y de excitación de ondas internas (Ibarra, 2012) alterando así la calidad y usos del agua. Así, es relevante entender el régimen térmico de los ríos y evitar su alteración.

Los factores que influyen la temperatura de los ríos, se pueden clasificar en 4 grupos (Cassie, 2006):

- Condiciones atmosféricas
- Topografía
- Descarga de flujos (caudales afluentes y efluentes)
- Lecho del río

Las condiciones atmosféricas corresponden al factor más importante y son las responsables de los procesos de intercambio de calor que ocurren en la superficie, intercambio de energía producto de la radiación de onda larga y onda corta, evaporación y flujos de calor por convección. La topografía y ubicación geográfica influyen las condiciones atmosféricas que se van a tener. La descarga de flujos afecta principalmente la capacidad de intercambio de calor producto de las variaciones de volumen y genera cambios en la temperatura producto de la mezcla que puede inducir la descarga y el lecho del río al

intercambiar calor con el agua. Este último factor es el que se ve más influenciado producto de la construcción de una central (Cassie, 2006).

La temperatura del agua presenta fluctuaciones diarias y anuales, en respuesta a las variaciones diarias y estacionales en la cantidad y tipo de energía térmica ganada o cedida por un flujo, el volumen y la fuente de la escorrentía contribuyente a la descarga.

Las variaciones de la temperatura respecto del régimen natural producto de la acción del hombre, se deben a la deforestación, el cambio climático, cambios en los flujos producto del uso de agua para riego o para generación eléctrica y producto de la liberación selectiva de flujos en embalses estratificados, en donde la magnitud de la alteración térmica depende del grado de estratificación y de la profundidad de la toma para la descarga.

El régimen térmico de un río se puede definir como el patrón temporal del comportamiento de la temperatura y describe la distribución de la temperatura del agua, la frecuencia con que se repiten ciertas temperaturas y el momento en el día o dentro del año que ocurre una cierta temperatura.

Diversos estudios se han centrado en ver cómo las centrales de embalse alteran la temperatura del agua del río (Olden, 2010) analizando principalmente periodos mensuales y/o anuales. Para poder cuantificar esta alteración térmica se han encontrado más de 20 indicadores (Steel, 2007, Olden, 2010) dentro de los que se incluyen valores máximos y mínimos diarios, mensuales y anuales, rango de fluctuaciones de temperatura, duración de los eventos de temperaturas máximas y promedios diarios entre otros. Los indicadores encontrados en la literatura tienen escalas diarias, mensuales y/o anuales, por lo que para efectos de este trabajo no sirven dado que no permiten capturar el efecto de la operación horaria de la central en la temperatura de salida del agua del embalse, por lo que es necesario determinar indicadores de alteración térmica intradiarias (IATI), que permitan cuantificar el patrón temporal del comportamiento de la temperatura.

Una de las formas de analizar el comportamiento de la temperatura, es mediante la utilización del rango diurno de temperatura (RDT). Este índice meteorológico refleja la variación entre la temperatura atmosférica máxima y mínima en un día. En general la temperatura mínima ocurre cerca del amanecer producto del enfriamiento radiactivo nocturno de la superficie terrestre y la temperatura máxima ocurre usualmente unas horas después del mediodía, este ciclo suele tener un comportamiento sinusoidal y se puede ver afectado por la cantidad de nubes, ubicación geográfica, existencia de cuerpos de agua, tipo de suelo y su cubierta, entre otros. En un cauce natural la temperatura del agua, depende de varios factores, en donde la más importante corresponde a las condiciones atmosféricas, por lo que se espera que el régimen térmico de un cauce natural sea similar a las condiciones de temperatura de la zona.

## **2.4. Coordinación Hidrotérmica (CHT)**

El problema de la CHT corresponde a la optimización simultánea de una función asociada al abastecimiento de la demanda eléctrica, aprovechando los recursos térmicos e hidráulicos

en las cuencas y embalses del sistema, y respetando las restricciones técnicas asociadas a cada tipo de generación, determinando así un nivel óptimo de generación a partir de cada central en un sistema hidrotérmico. Dependiendo del horizonte de tiempo a considerar y consecuentemente del objetivo perseguido, el problema de CHT se plantea matemáticamente de forma muy distinta (Troncoso, 2010), existiendo simulaciones de corto, mediano y largo plazo.

Los modelos de despacho son los encargados de resolver los problemas de coordinación hidrotérmica para corto, mediano y/o largo plazo. Los modelos de largo plazo utilizan programación dinámica estocástica (PDE) o en los casos más complejos programación dinámica dual estocástica (PDDE) poseen etapas de semanas o meses y tienen un horizonte de evaluación de meses hasta años, se basan en la observación de la función de costos futuros esperados (FCFE), la cual se puede representar como una función lineal por partes (Palacios, 2004). Por otro lado los modelos de corto plazo son determinísticos y poseen etapas horarias con un horizonte de planificación semanal.

La CHT se desarrolla para poder satisfacer en un cierto periodo de tiempo la demanda de energía, utilizando de manera óptima los recursos hídricos, lo que se traduce en un menor costo para el sistema. Para esto es necesario considerar que en los sistemas de generación hidráulicos la decisión operativa de hoy afecta directamente los costos operativos de mañana, por lo que la CHT debe balancear el beneficio asociado a usar inmediatamente el agua disponible con el beneficio esperado que se obtendría de almacenarla (Figura 2.1). Así, si en un periodo se utiliza un volumen pequeño de agua embalsada para generar energía necesariamente se debe utilizar energía térmica para satisfacer la demanda energética, lo que se traduce en mayores costos inmediatos, producto del consumo de combustible de las centrales térmicas. Sin embargo, en la siguiente etapa se puede aprovechar el agua embalsada teniendo así menores costos futuros. La función de costos inmediatos (FCI) está relacionada directamente con el costo de la energía térmica utilizada para satisfacer la demanda energética en función de la cantidad de agua utilizada. La función de costo futuro (FCF) corresponde al beneficio futuro de tener una cierta cantidad de agua almacenada al final de un periodo, esta función tiene un carácter estocástico, dada la incertidumbre hidrológica entre un periodo y otro razón por la cual se transforma en una función de costos futuros esperados (FCFE). Matemáticamente lo que se busca es minimizar la siguiente función objetivo:

$$\min_x z = \sum_{i,t} \Delta t \cdot C_i \cdot P_i^t + \sum_{b,t} \Delta t \cdot CENS \cdot PENS_b^t + \sum_s \frac{1}{S} \cdot FCF_s \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

- $\Delta t$  : Duración de la etapa  $t$ .
- $C_i$  : Costo variable de la central  $i$ .
- $P_i^t$  : Potencia despachada por la central térmica  $i$  en el periodo  $t$ .
- $CENS$  : Costo de la potencia no suministrada.
- $PENS_b^t$  : Potencia no suministrada en la barra  $b$  en el periodo  $t$ .
- $S$  : Número de simulaciones futuras.
- $FCF_s$  : Función de costo futuro asociada a la simulación futura  $s$ .

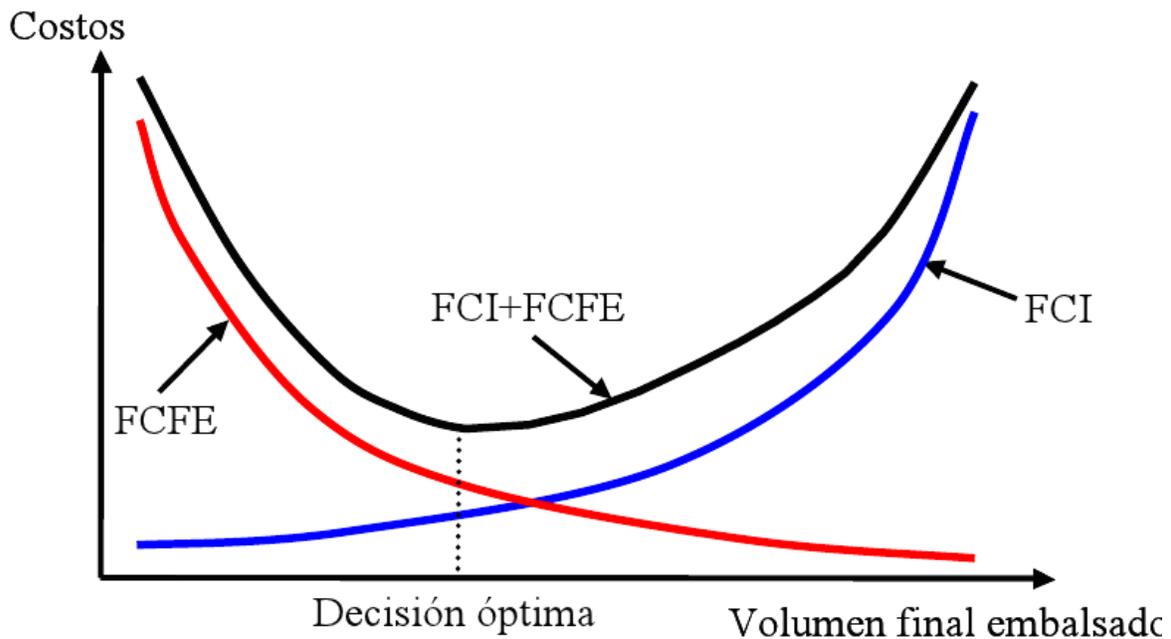


Figura 2.1.-Función objetivo de cada etapa (Troncoso, 2008).

En palabras simples, el primer término representa el costo de operación de las centrales térmicas, el segundo expresa el costo de la potencia no suministrada en la barra  $b$  y el tercero corresponde a la función de costo futuro utilizada para asociarle un valor al volumen de agua embalsada al final de cada periodo.

## 2.5. Modelos de Despacho

En Chile el sistema eléctrico se encuentra dividido en 4 subsistemas, siendo el más importante el Sistema Interconectado Central (SIC). El SIC comprende el área ubicada desde la rada en Paposo (Región Antofagasta) y la localidad de Quellón (Región de Los Lagos), su potencia instalada corresponde a un 72% de la capacidad del país, satisface cerca del 93% de la población de Chile y es en este sistema donde se encuentran las centrales hidráulicas de embalse.

La coordinación del SIC está a cargo del Centro de Despacho Económico de Carga del Sistema Interconectado Central (CDEC-SIC), el que administra un parque generador cercano a las 12.200 MegaWatts de potencia instalada, de los cuales un 44% es de carácter hídrico, un 54.6% de generación de carácter térmico y un 1.4% de generación eólica.

Dependiendo del periodo de planificación, el CDEC-SIC utiliza un modelo de programación de largo-mediano plazo (PLP) y uno de corto plazo (PCP). Las características de los modelos mencionados anteriormente son las siguientes:

	Largo-mediano Plazo (PLP)	Corto Plazo (PCP)
Etapas	Semanas – Meses	Horarias
Horizonte	Meses – Años	Semanal
Naturaleza	Estocástica	Determinística

**Tabla 2.1.- Características de los modelos de programación.**

### 2.5.1. Modelos SEEDS y MIPUC

En el Centro de Energía de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile (CE-FCFM) se desarrollaron réplicas de los modelos de programación usados por el CDEC-SIC con el fin de usarlas como una herramienta educacional y evitar el efecto de “caja negra” que se tiene en los modelos del CDEC-SIC, en donde no se conoce el detalle de la modelación utilizada para obtener los resultados.

Las réplicas de los modelos de PLP y de PCP, respectivamente son:

- SEEDS: Stochastic Electric Economic Dispatch Scheduling.
- MIPUC: Mixed Integer Programming Unit Commitment.

El modelo SEEDS resuelve el problema de CHT utilizando el método de programación dinámica dual estocástica que descansa en el método de descomposición de Benders (Troncoso 2010), posee una plataforma computacional denominada DeepEdit, la que permite una confección de sistemas ficticios para comprender de mejor manera el sistema eléctrico dentro de la CHT. Dentro de los datos de entrada (Inputs) más relevantes de este modelo, se encuentran:

- Potencia máxima y mínima de cada central generada, con su respectiva relación que permite la conversión lineal entre potencia y caudal empleado.
- Cota y costo marginal de cada embalse en la parte final del horizonte de evaluación.
- Datos hidrológicos de los distintos afluentes de cada central.

La cantidad de datos depende del horizonte de evaluación y del largo de cada etapa. Para este trabajo son necesarios periodos de evaluación con una duración de una semana. Los datos de salida (outputs) más relevantes entregados por el modelo SEEDS son los siguientes:

- Función de Costos Inmediatos (FCI) y Función de Costos Futuros Esperados (FCFE) de cada uno de los embalses.
- Generación térmica e hidráulica.
- Volumen almacenado por cada uno de los embalses.

De los outputs del modelo SEEDS el más relevante corresponde a la FCFE de cada embalse (multiembalse), las cuales están determinadas para una semana y corresponde al input del modelo MIPUC.

El modelo MIPUC está definido para corto plazo, se encuentra escrito en Java y su horizonte de evaluación es corresponde a una semana (Avilés, 2012). Un input de este modelo como se mencionó anteriormente corresponde a las FCFE entregados por el modelos de PLP y los outputs corresponden a las series de tiempos de caudales turbinados para el sistema de interés a nivel horario. La interacción y resultados de los modelos SEEDS y MIPUC se esquematizan en la figura 2.2.

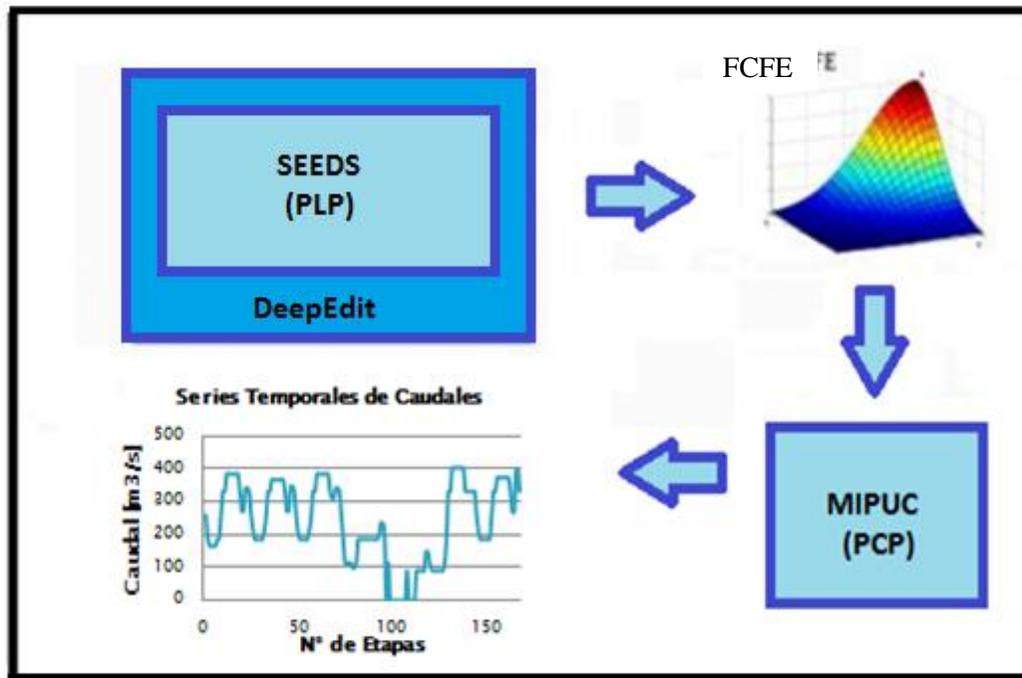


Figura 2.2.-Metodología del uso de los modelos SEEDS y MIPUC (Fuente: Avilés, 2012).

Producto de que las FCFE para el periodo a evaluar ya fueron determinadas por el CE-FCFM, para efectos de este trabajo sólo se utilizará el modelo MIPUC, el que al ser un modelo de corto plazo entrega las series temporales de caudales para una semana en particular.

## 2.6. Modelo Numérico CWR-ELCOM

El modelo tridimensional CWR-ELCOM (*Estuary, Lake and Coastal Ocean Model*) es una herramienta de simulación numérica aplicada a lagos, estuarios y represas, utilizada para simular la hidrodinámica de un volumen de agua. El modelo resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes usando la aproximación hidrostática para la presión, el algoritmo numérico

se basa en el método de Euler-Lagrange para la advección, con una solución del gradiente conjugado para la altura de la superficie libre (Ibarra, 2012).

Para la ejecución el modelo numérico se requiere información de los caudales y los datos meteorológicos necesarios para determinar los flujos de calor y los intercambios entre el agua y el aire. Específicamente se requieren los caudales promedios diarios afluentes y los caudales horarios efluentes, la temperatura y salinidad del caudal afluente, temperatura del aire, presión atmosférica, radiación solar incidente, cobertura de nubes, velocidad del viento y humedad relativa (Ibarra, 2012). Otro input necesario es la batimetría de la zona, para lo que se requiere una discretización espacial con lo que se obtiene una grilla del lugar.

Este modelo permite obtener diferentes parámetros relevantes del cuerpo de agua, tales como la densidad, temperatura, calor latente, entre otros, los que se pueden obtener a diferentes escalas de tiempo. Los resultados se pueden obtener tanto para perfiles verticales, transversales, en un punto o en un conjunto de puntos.

## **2.7. Interacción entre el Modelo de Operación y el Modelo Hidrodinámico**

Para obtener las series temporales de temperatura de salida del agua, se requiere trabajar con ambos modelos, a partir del modelo MIPUC, se obtienen las series temporales de caudales para una semana en particular, teniendo así 168 datos de caudales horarios, los que son datos de entrada para el modelo CWR-ELCOM. Dado que para trabajar con el modelo CWR-ELCOM, se requieren datos meteorológicos, de caudales, velocidad del viento, etc., se trabajará con los datos recolectados por Ibarra (2012) a partir de los cuales se pueden hacer las diversas simulaciones del modelo, en donde en este caso sólo se modificarán los valores de las series horarias de caudales efluentes del embalse (input de CWR-ELCOM) a partir de los cuales se obtienen las series temporales de temperatura del agua en su punto de extracción. La Figura 2.3 resume la forma en la que serán usados ambos modelos.

Dado que para efectos de este trabajo se analizarán diferentes escenarios, es necesario aplicar restricciones que modifiquen la operación con respecto a la operación real del embalse. Las restricciones de operación se aplican al modelo MIPUC y a partir del cual se obtienen las series temporales de caudales para cada restricción, las que son ingresadas al modelo CWR-ELCOM de donde se obtienen finalmente las series temporales de temperatura para los casos en estudio.

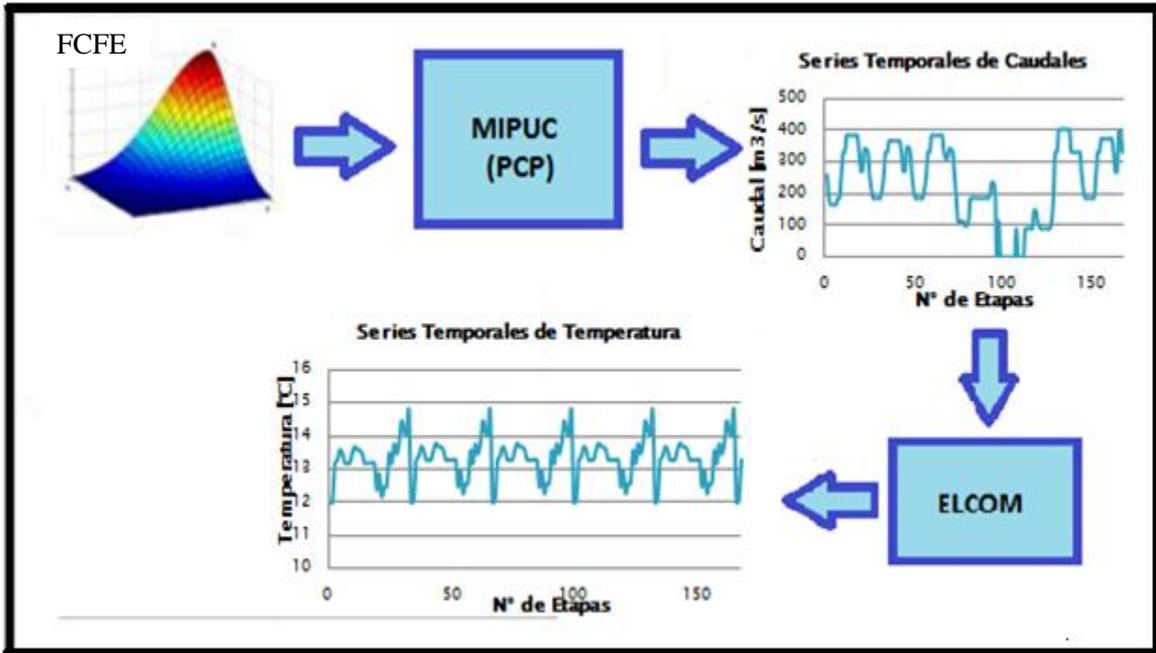


Figura 2.3.- Interacción entre los modelos MIPUC y CWR-ELCOM.

### **3. DESCRIPCIÓN Y OPERACIÓN DEL EMBALSE RAPEL**

En este capítulo se detallan las características principales del embalse Rapel, tanto como su ubicación, clima de la zona, principales afluentes, características de la presa y del embalse y su operación.

#### **3.1. Descripción del Embalse Rapel**

El embalse Rapel fue construido por Endesa, con la finalidad de generar energía hidroeléctrica y dio origen al lago de su mismo nombre. Se ubica en la Región del Libertador Bernardo O'Higgins y fue puesta en marcha en 1968. Este embalse no es de gran tamaño por lo que opera principalmente en función de sus afluentes y para satisfacer las demandas de energía que no pueden ser satisfechas por el resto de las grandes centrales (Martínez, 2003).

En el sector del muro la profundidad llega actualmente a los 50 metros. Posee un volumen de almacenamiento de aproximadamente  $720 \text{ hm}^3$ , el lago tiene aproximadamente 30 km de largo, generando una superficie inundada de 8000 há.

Aguas abajo de la presa se forma el río Rapel que transporta las aguas utilizadas para la generación eléctrica y aquellas que son evacuadas por los vertederos. Dado que este río se forma por las aguas provenientes de la central no posee un régimen definido y puede llegar a presentar épocas de sequía en los momentos en que no se genera energía (de la Fuente, 2003).

Diversos estudios, como los de Antenucci (1996), Martínez (2003), se han realizado en el embalse Rapel, en los que se ha analizado la limnología del embalse, el comportamiento del fitoplancton, la calidad del agua, la hidrodinámica, la estratificación y sus efectos, mortandad de peces producto de la construcción del embalse, etc.

##### **3.1.1. Ubicación**

El embalse Rapel se emplaza en la comuna de Las Cabras, provincia del Cachapoal, en la Región del Libertador Bernardo O'Higgins, se encuentra en el límite de las provincias de Cardenal Caro y Cachapoal. (Figura 3.1).

El clima predominante de la zona corresponde al Clima Templado Mediterráneo, posee características mediterráneas con veranos cálidos y secos e inviernos lluviosos, frescos y húmedos. La diferencia de temperatura entre el mes más cálido y el más frío es del orden de los  $8^\circ\text{C}$ , con una temperatura media de  $14^\circ\text{C}$ . Los valores registrados de precipitación, son mayores durante las temporadas invernales especialmente durante los meses de junio, julio y agosto y fluctúan entre 200 y 1200 mm/año. ([www.meteochile.cl](http://www.meteochile.cl)).



**Figura 3.1.- Ubicación Lago Rapel (Fuente Google Maps).**

### **3.1.2. Características Generales de la Cuenca**

La cuenca del río Rapel abarca cerca de un 89% de la totalidad de la VI Región, comprende las provincias de Cachapoal, Colchagua, parte de las Provincias de Cardenal Caro y Melipilla. Los centros urbanos más importantes son Rancagua y San Fernando (Cade-Idepe, 2004).

En la cuenca del río Rapel se tienen 8 centrales, siete de pasada y una de embalse. Las centrales de pasada corresponde a la central Sauzal (capacidad instalada 76.8 MW), Sauzalito (capacidad instalada 9.5 MW), Pangal y Coya (capacidad instalada conjunta de 76 MW), Chacanes (capacidad instalada 111 MW), La Higuera (capacidad instalada 155 MW) y la Confluencia (capacidad instalada 156 MW) (<http://pacifichydro.cl>). Para efectos de este trabajo, no se considerarán las centrales de pasada dado que no afectan a los afluentes de Rapel.

### **3.1.3. Características Principales del Embalse Rapel**

El embalse Rapel está formado por la junta del río Rapel y el estero Alhué (régimen pluvial). El río Rapel a su vez nace en la unión del río Tinguiririca (régimen pluvial) y el río Cachapoal (régimen pluvio-nival), los cuales aportan la mayor parte del caudal afluente al embalse, aproximadamente un 62% el río Cachapoal y un 36% el río Tinguiririca (Antenucci,1996).

La central hidroeléctrica Rapel posee 5 unidades Francis, un caudal de diseño de  $535 \text{ m}^3/\text{s}$  y un caudal máximo de  $587 \text{ m}^3/\text{s}$ , tiene una potencia instalada de 378 MW (75.6 MW por unidad). El embalse tiene un volumen máximo de  $433.32 \text{ Mill.m}^3$  y mínimo de  $142.65 \text{ Mill.m}^3$ , su cota máxima se encuentra los 105.02 m.s.n.m. y su cota mínima de operación es a los 100.47 m.s.n.m. y la extracción para la generación se realiza a 55 m.s.n.m (aproximadamente 33 metros de profundidad desde la cota máxima del embalse).

La presa de Rapel corresponde a una bóveda de hormigón cuya parte superior posee un radio de curvatura de 174 [m] y 350[m] de largo, su altura es de 112 [m]. Posee dos vertederos evacuadores de crecidas controlados por compuertas ubicados en los costados del muro, los que en conjunto tienen una capacidad vertedora de  $9300 \text{ m}^3/\text{s}$ .

En la actualidad el embalse Rapel, no posee un caudal mínimo de operación, producto de que la modificación del Código de Aguas que hace referencia a los caudales ecológicos (Artículo 129, bis 1, Ley 20.017 de 2005) fue realizada posteriormente a la entrada en funcionamiento de la central Rapel.



**Figura 3.2.- Embalse Rapel (Fuente: MOP).**

#### **3.1.4. Temperatura en el Embalse**

Diferentes estudios se han realizado para analizar la calidad de aguas y la hidrodinámica del embalse Rapel, Ibarra (2012), Martínez (2003), de la Fuente (2003), observando distintos fenómenos como la eutroficación, excitación de ondas internas o concentración de compuestos nitrogenados que se producen en cada una de las cubetas.

Uno de los factores estudiados en el embalse corresponde a la temperatura, especial énfasis se ha puesto en la cubeta del muro, en donde se tiene que la profundidad del punto de extracción de la central define el comportamiento estacional de la temperatura de la columna de agua cerca del muro (de la Fuente, 2003).

En el lago Rapel, específicamente en la zona del muro, se observa marcadamente la presencia de una termoclina en los periodos estivales, que da por origen a la existencia de un epilimnio e hipolimnion, en el primero se tienen diversas interacciones con la atmósfera y una temperatura influenciada principalmente por los factores atmosféricos como la radiación y la temperatura del aire, mientras que en la zona más profunda se tienen menores temperaturas y se han observado periodos de anoxia.

La estratificación que se observa en la zona del muro de Rapel tiene además de un factor estacional una influencia producto de la operación de la central, en donde se han observado fenómenos de mezcla como reacción al pulso de extracción (Ibarra, 2012) y variaciones en la ubicación de la termoclina, lo que determina la temperatura del agua de salida del embalse.

### **3.2. Operación Central Rapel**

A partir de los modelos usados por el CDEC-SIC es posible obtener una operación programada para el embalse, que no necesariamente coincide con la operación real de las centrales que forman parte del SIC. Esto es producto de los cambios que pueden surgir en el día producto incertidumbre que existe con respecto a la demanda, la hidrología y la disponibilidad de las centrales.

Con la información disponible en la página del CDEC-SIC ([www.cdec-sic.cl](http://www.cdec-sic.cl)) es posible conocer la cota de los embalses y las operaciones reales a diferentes escalas de tiempo de las centrales que forman parte del SIC, con lo que es posible determinar si una central opera de manera base o sólo para satisfacer las fluctuaciones en la demanda energética. Para conocer la operación del embalse Rapel se usaron los registros de la operación de los años 2009, 2010 y 2011.

#### **3.2.1. Series de Tiempo de Caudal Horario**

Las series de tiempo de caudales horarios se obtienen a partir de la información de la operación real diaria y programada entregada por el SIC, en donde se detallan las potencias medias horarias desde el año 2000 a la actualidad de todas las centrales que forman parte del sistema. A partir de los registros de potencias generadas se pueden determinar las variaciones a nivel horario del régimen hidrológico aguas abajo del punto de restitución, considerando que la potencia generada se relaciona con el caudal turbinado. La relación entre la potencia generada y el caudal vertido depende entre otras cosas de los siguientes términos:

$$P = n_T \cdot n_t \cdot n_G \cdot g \cdot \rho \cdot Q \cdot H_n \quad \text{Ec. 5}$$

Donde:

$P$  : Potencia eléctrica generada [MWh].  
 $n_T$  : Rendimiento de la turbina.  
 $n_t$  : Rendimiento del transformador.  
 $n_G$  : Rendimiento del generador.  
 $g$  : Aceleración de gravedad [ $\text{m/s}^2$ ].  
 $\rho$  : Densidad del agua [ $\text{kg/m}^3$ ].  
 $Q$  : Caudal turbinado [ $\text{m}^3/\text{s}$ ].  
 $H_n$  : Altura neta [m].

La Ec. 5, se puede simplificar dejando la potencia en función de un coeficiente, el caudal y la altura neta.

$$P = \alpha \cdot Q \cdot H_n \quad \text{Ec. 6}$$

En donde los términos incluidos en  $\alpha$  dependen directamente del caudal, pero su variación se puede considerar despreciable para efectos de este trabajo y constantes a lo largo de una semana (periodo de evaluación del modelo MIPUC), por lo que finalmente se utilizará la Ec. 6 para determinar las series de tiempo de caudales horarios para el escenario actual a partir de los datos de operación y de las cotas del embalse Rapel entregadas por el CDEC-SIC.

Para ilustrar la operación de la central Rapel se tomó una semana al azar representativa de cada estación del año (semana del 19-25 de enero, semana del 16-22 de abril, semana del 5-11 de julio y semana del 12-18 de noviembre), en las que se ve que la operación no es continua en el tiempo y sólo se mantiene operando durante algunas horas al día. Para los 3 años se registran periodos donde la generación es nula y se observan variaciones horarias que superan los  $400[\text{m}^3/\text{s}]$ .

En la semana del mes de enero es en donde se registran los caudales de operación más bajos comparados con el resto de las semanas y se tienen periodos más largos y seguidos en donde la central no se encuentra generando, esto producto de la menor disponibilidad que se tiene del recurso en esta época (Figura 3.3). Una situación similar se observa en la semana del 12 al 18 de noviembre (Figura 3.6) en donde la central se encuentra gran parte del tiempo sin generar. En particular para ambas semanas se observa que el año con menor operación registrada corresponde al 2011, llegando en enero a encontrarse sin operar aproximadamente un 75% del tiempo.

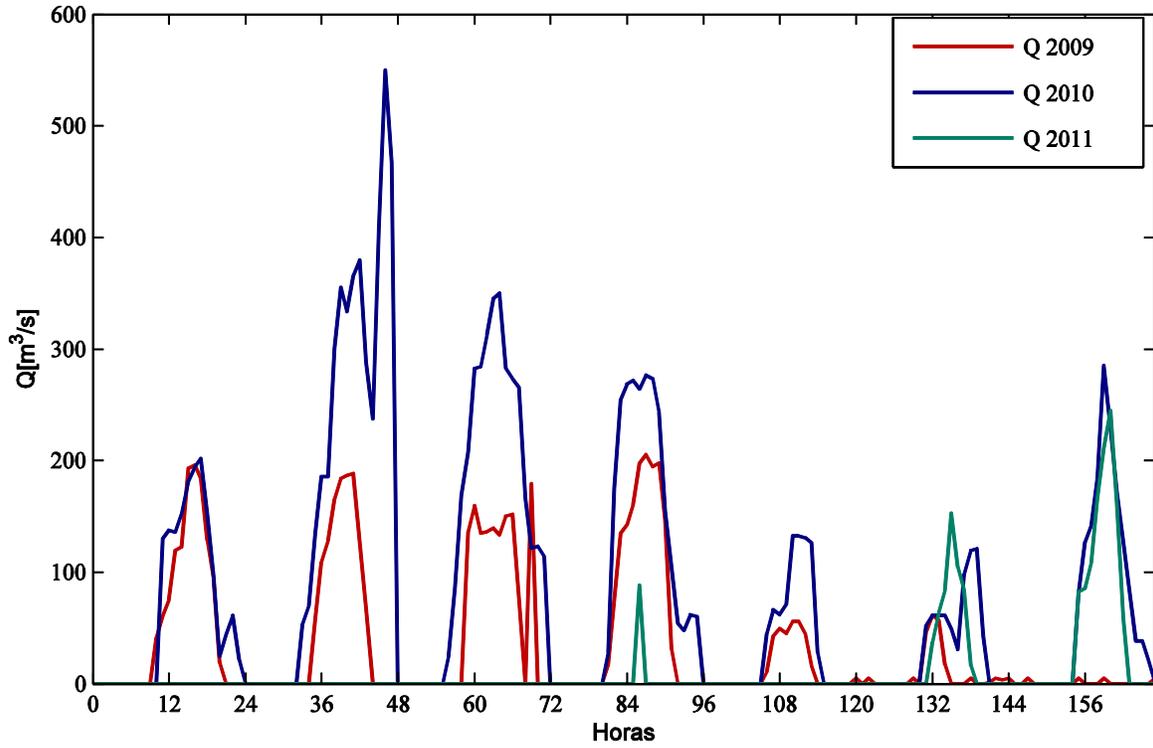


Figura 3.3.- Operación real 2009, 2010, 2011. Semana 19-25 enero.

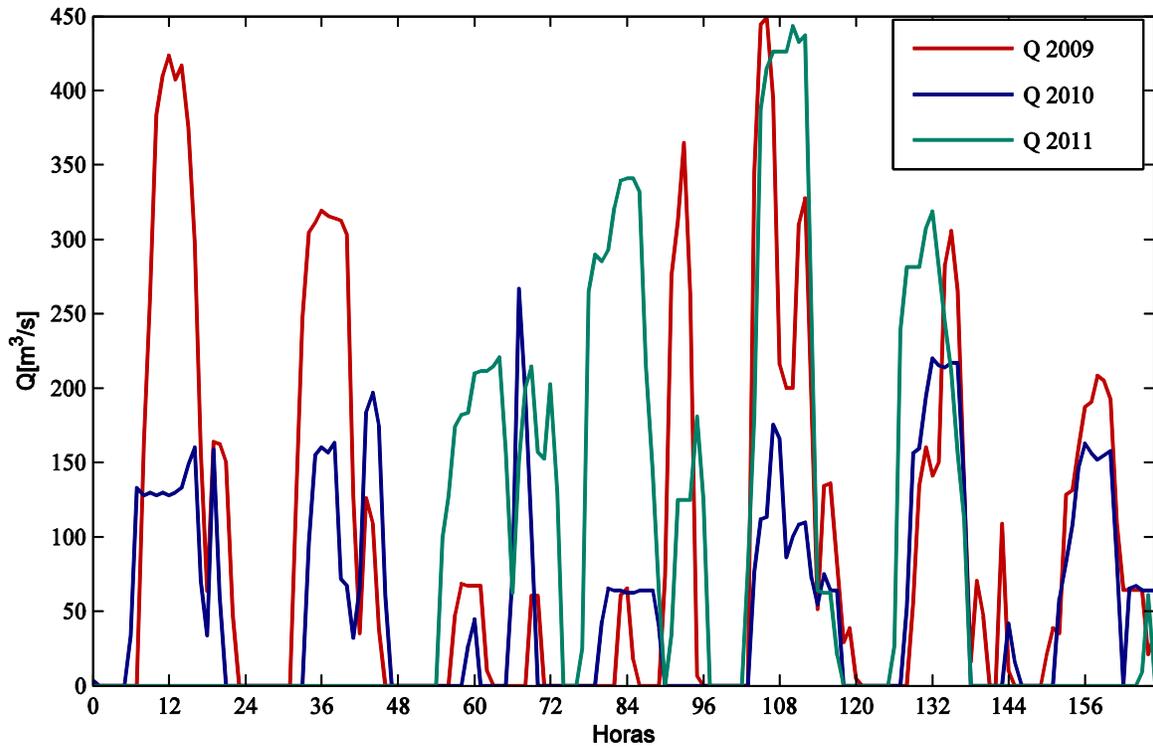


Figura 3.4.- Operación real 2009, 2010, 2011. Semana 16-22 abril.

Para la semana escogida de abril, Figura 3.4, y julio, Figura 3.5, se observa una operación mayor en la central, con menores intervalos con generación nula, se tienen grandes diferencias en la operación entre horas consecutivas y los mayores valores de caudales vertidos, con valores que superan los 500 m<sup>3</sup>/s, esto producto de la mayor disponibilidad que se tiene en estas épocas del recurso, producto de las lluvias y deshielos. Al comparar los tres años se observa nuevamente que el 2011 es el año en donde se tiene menor generación y mayores valores nulos de operación, por lo que se puede inferir que el año 2011 es el más seco de los tres.

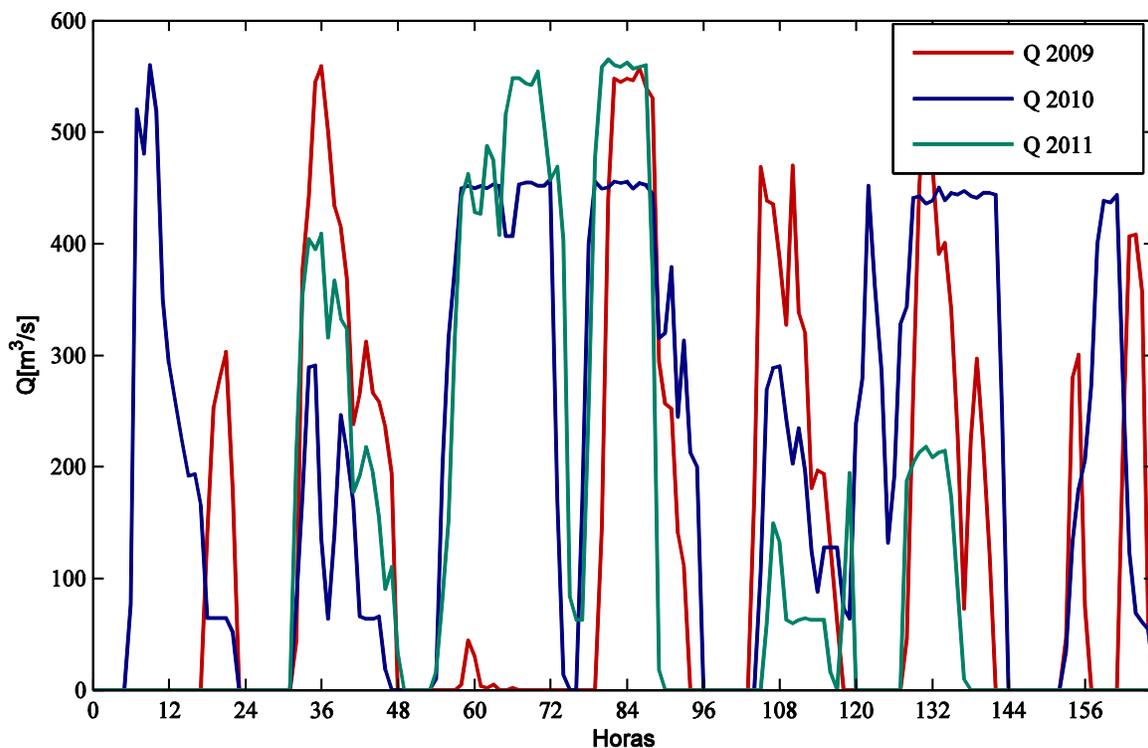


Figura 3.5.- Operación real 2009, 2010, 2011. Semana 5-11 julio.

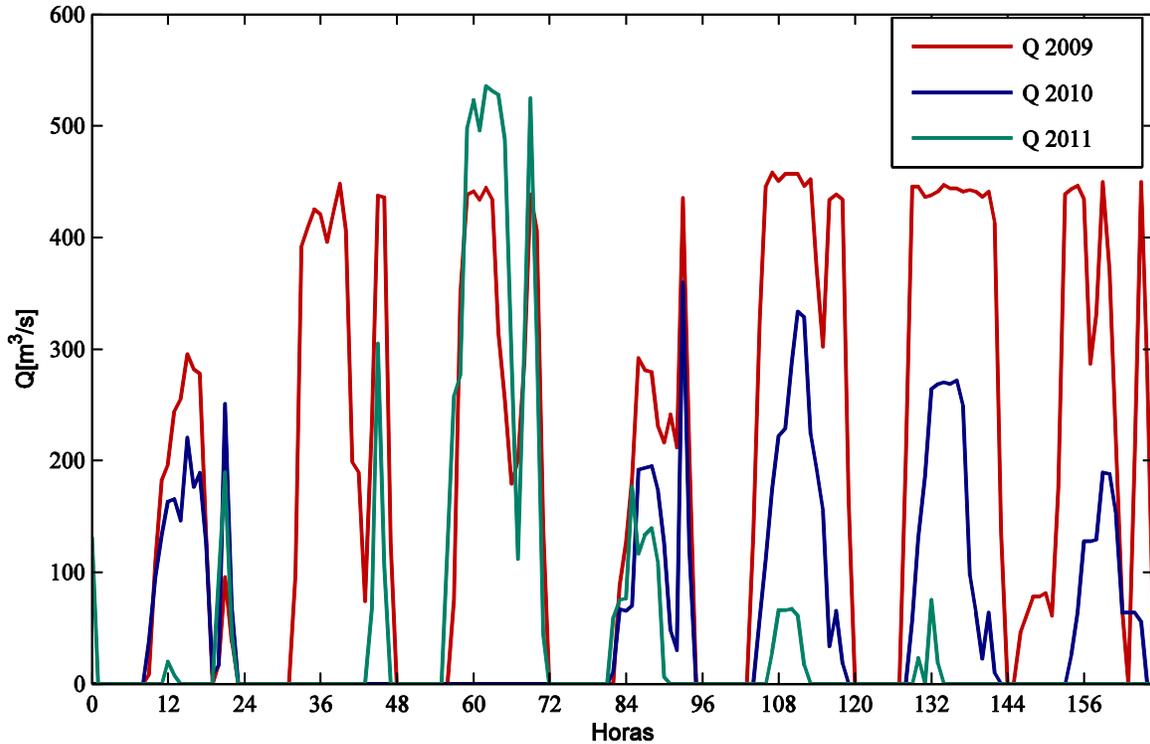


Figura 3.6.- Operación real 2009, 2010, 2011. Semana 12-18 noviembre.

Con los resultados mostrados se ve que la central Rapel tiene una operación en función de los *peaks* de demanda, que no opera de manera constante en el tiempo y tiene fluctuaciones horarias que llegan a superar  $500 \text{ m}^3/\text{s}$ . En las centrales que tienen este tipo de operación, se espera que en un día la central opere sólo para satisfacer los *peaks* de demanda energética, durante un intervalo continuo de horas en el día.

Con todos los datos horarios para los 3 años observados, es posible construir curvas de frecuencia acumulada para la operación horaria de la central, ver Figura 3.7, donde se observa que para el año más seco (2011) la central se encuentra operando sólo un 30% del tiempo, mientras que para el 2009 y el 2010 la central no opera un 44% y 47% del tiempo respectivamente. Para los tres años se observa que la central no se encuentra en funcionamiento más de la mitad del tiempo y en los casos que lo hace puede llegar a operar a valores cercanos a su capacidad máxima, con un promedio de caudal horario vertido de 116, 84 y 57  $[\text{m}^3/\text{s}]$  para los años 2009, 2010 y 2011 respectivamente.

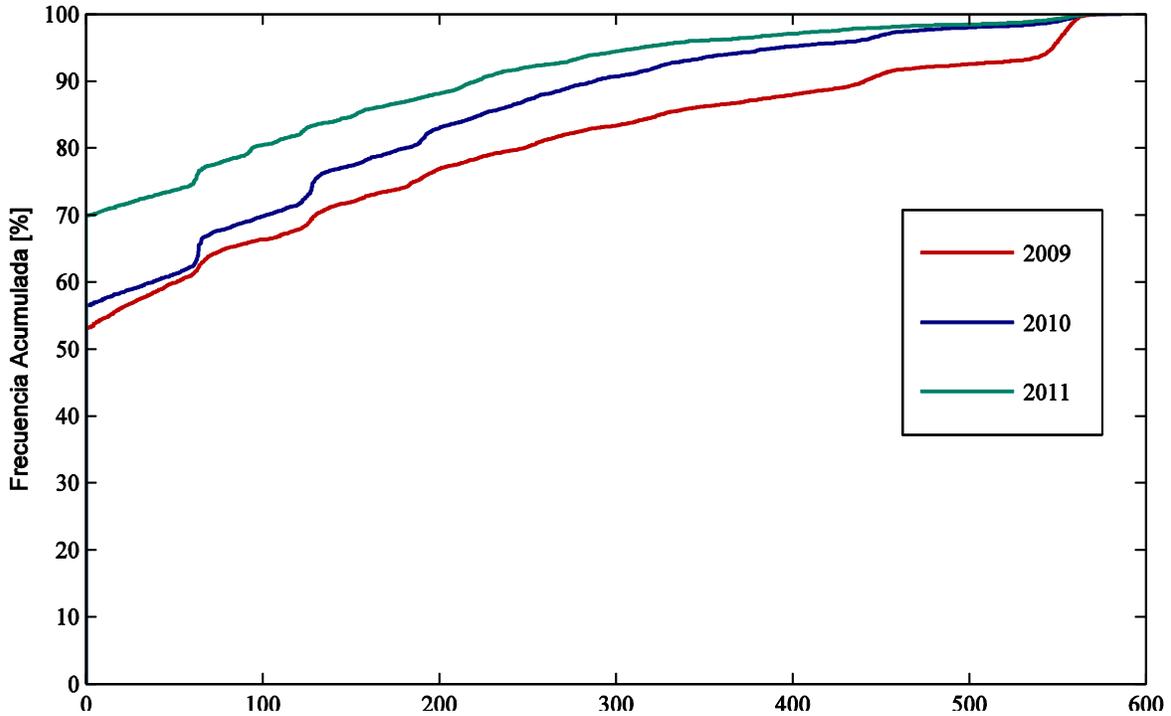


Figura 3.7.- Frecuencia acumulada de operación horaria. Año 2009, 2010 y 2011.

Dado que la operación mediante el *hydropeaking* se caracteriza por tener variaciones en la operación en cortos periodos de tiempo se analiza la variación de caudal entre horas consecutivas para los 3 años, Figura 3.8, donde se tiene que para el año 2011 el 70% del tiempo no hay fluctuaciones intradiarias a diferencia del año 2009 donde no se tienen fluctuaciones horarias un 52% del tiempo. En promedio para los 3 años un 60% del tiempo la central no presenta variación entre la operación de una hora y la siguiente, esto puede ser producto de que se encuentra sin operar o que mantiene una operación constante. Para los años analizados se tienen fluctuaciones horarias que superan los 400 [m<sup>3</sup>/s] y nuevamente se verifica que el 2011 es el año con menor operación, lo que genera menores fluctuaciones horarias las que en promedio son aproximadamente de 20 [m<sup>3</sup>/s].

A partir de los datos de la operación de la central Rapel, se verifica que su operación está enfocada en satisfacer los *peaks* de demanda, no es continua en el tiempo y posee variaciones de generación considerables entre horas consecutivas, respondiendo así a las características del *hydropeaking*.

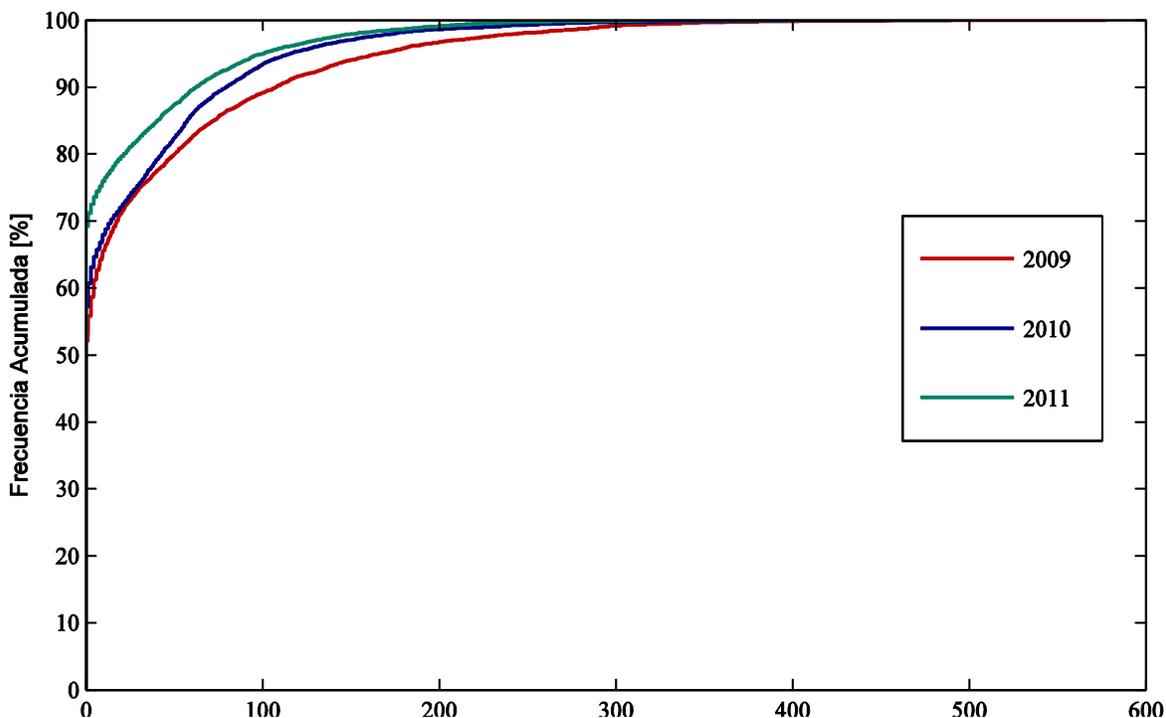


Figura 3.8.- Curva de duración de la variación intrahoraria de caudal. Años 2009, 2010 y 2011.

### 3.3. Operación Real y Programada

Producto de que la programación a corto plazo tiene una naturaleza determinística existen diferencias entre la operación programada, obtenida de los modelos de despacho, con la operación real. Sumado a esto hay una incertidumbre asociada tanto a la demanda energética como a la hidrología y eventualidades que se tienen en el día que no son contempladas por el modelo que generan diferencias entre la operación real con la programada.

Los resultados obtenidos a partir del modelo MIPUC corresponden a una operación programada, razón por la que se analizará si los efectos en la alteración hidrológica producidos por esta operación son menores o mayores que los generados por la operación real.

#### 3.3.1. Indicadores de Alteración Hidrológica

Para efectos de este trabajo es relevante la alteración en el régimen hidrológico producida por la operación, razón por la cual se utilizarán los IAH propuestos en el Capítulo 2.2, para comprar la alteración asociada a cada operación, para determinar si al utilizar los datos entregados por el modelo MIPUC se están sobrestimando o subestimando los resultados al ser estos valores de operación programada y no de operación real.

A partir de los registros de operación real y operación programada entregadas por el CDEC-SIC, es posible conocer los caudales de operación horarios de la central Rapel y la cota diaria del embalse para ambos tipos de operación y calcular sus correspondiente IAHI. Para efectos de este análisis se usarán los datos del 2009, 2010 y 2011, dada la similitud de los resultados para los diferentes indicadores, sólo se mostrará el indicador R-B, el resto de los indicadores se adjuntan en el ANEXO A.

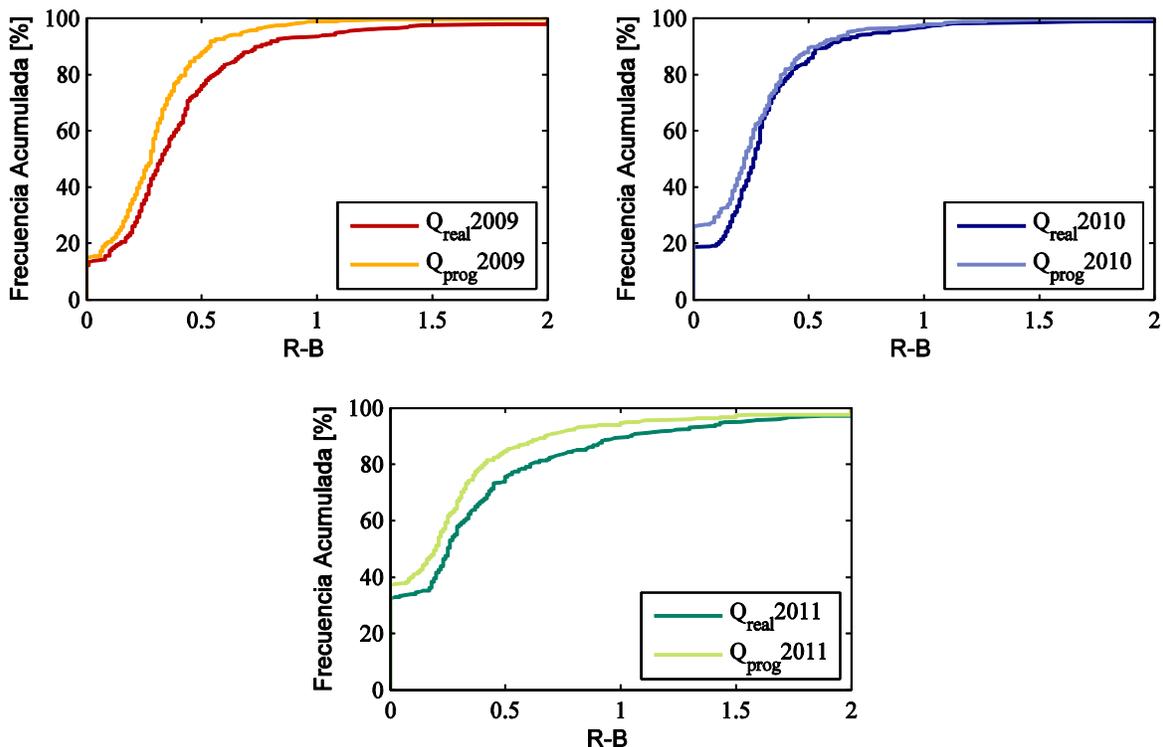


Figura 3.9.- Comparación indicador R-B. Periodo 2009-2010-2011.

Al comparar la operación programada con la real, se observa que esta última tiene una mayor alteración hidrológica asociada en comparación a la operación programada para los 3 años observados, ya que se encuentra más alejada del eje de las ordenadas y es de esperarse que en un régimen natural las fluctuaciones de caudales sean bajas sobre todo a una escala diaria de observación. Para efectos de este estudio, dado que los IAHI serán calculados a partir de los datos de la operación programada entregadas por el modelo MIPUC, se van a obtener valores de los indicadores menores a los que se tendrían si realmente operara el embalse bajo las condiciones impuestas, por lo que los IAHI calculados se van a encontrar subestimados en comparación a los indicadores que se obtendrían bajo las mismas condiciones en la operación real.

## 4. RESTRICCIONES AMBIENTALES A LA OPERACIÓN

Para mitigar los efectos producidos por el *hydropeaking*, se aplican restricciones ambientales en la operación de la central Rapel con la finalidad de obtener menores valores de los IAHI detallados en el Capítulo 2.2.

Producto de que el modelo MIPUC resuelve un problema de optimización lineal, introducir restricciones dentro de la optimización enfocadas en minimizar directamente los indicadores no resulta ser un problema sencillo. Las restricciones que se utilizarán son fáciles de implementar y de comprender en la práctica y están enfocadas en disminuir las fluctuaciones horarias de la operación de la central y en establecer un caudal mínimo aguas abajo. Estas restricciones a la vez tienen un enfoque ambiental, en donde al aplicar una limitación a la fluctuación horaria, se impiden aumentos o bajas repentinas del caudal aguas abajo de la central, mientras que con la restricción de caudal mínimo, se asegura mantener un flujo mínimo de agua para el desarrollo de especies y el uso de esta. Las restricciones se implementarán independientemente y luego de manera conjunta para ver las influencias que tienen y las mejoras asociadas a cada uno.

### 4.1. Periodo de Aplicación de las Restricciones

El periodo en el que se aplicarán las restricciones ambientales descritas anteriormente va desde el 01 de enero al 31 de diciembre del 2011, periodo para el cual en el CE-FCFM se tienen los datos de entrada necesarios para ejecutar el modelo MIPUC. Para efectos de este trabajo, se tomará el periodo de manera continua para posteriormente poder analizar el efecto de la extracción del agua y su efecto en la temperatura. El analizar el periodo de manera continua implica considerar continuidad entre semanas consecutivas. En la realidad la programación de corto plazo se hace de manera discontinua en donde el volumen final de los embalses esperado producto de la operación programada no necesariamente coincide con el volumen final real de los embalses, esto producto de las diferencias que se tienen entre la operación real y la programada, razón por la que el estado inicial de los embalses no proviene a partir de la operación programada si no a partir del estado real de los embalses. Para efectos de este trabajo dado que sólo es posible a partir de la aplicación de restricciones conocer la operación programada se considerará continuidad en los volúmenes de los embalses entre semanas consecutivas, en donde el volumen final de los embalses de una semana se obtiene a partir de la operación programada y coincide con el volumen inicial de los embalses de la semana siguiente.

El análisis de los resultados se realiza separando el año en dos periodos, uno seco y uno húmedo. A partir de los datos de entrada del modelo MIPUC, se pueden obtener valores promedios de caudales afluentes en cada semana, a partir de los cuales se obtiene un caudal medio mensual afluente al embalse (Figura 4.1). Este permite establecer los meses con mayores caudales afluentes, y por ende mayor, disponibilidad del recurso para la generación.

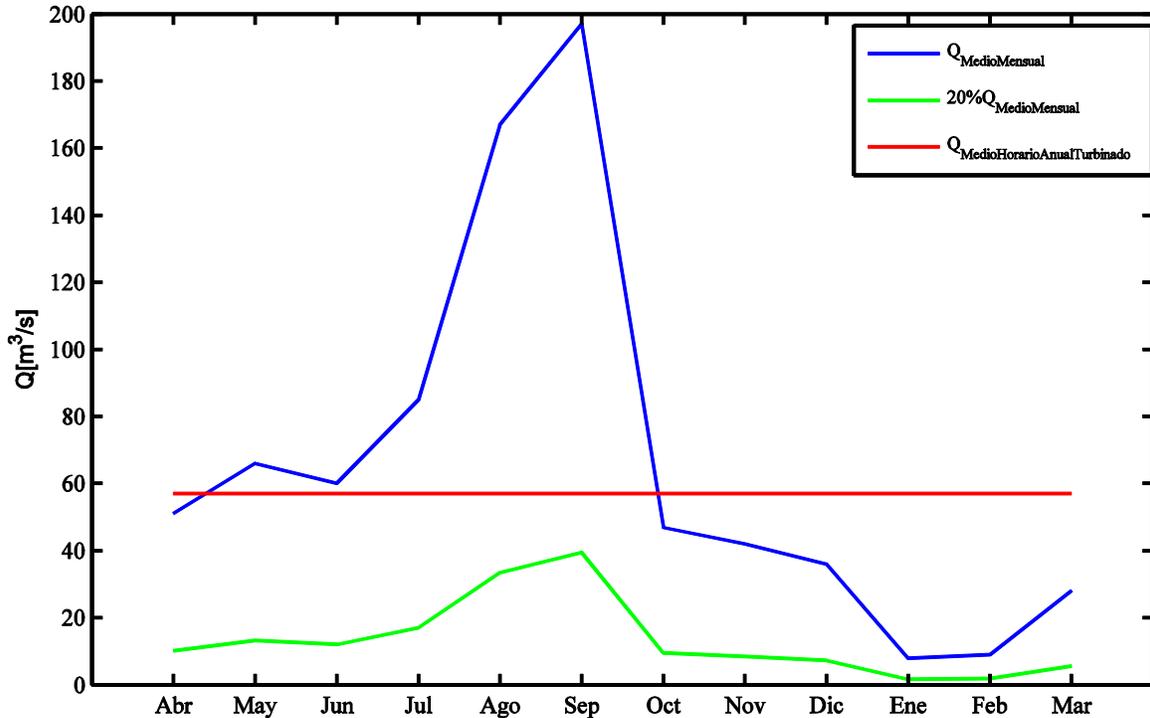


Figura 4.1.- Caudales medios mensuales afluentes al embalse Rapel. Periodo 2011.

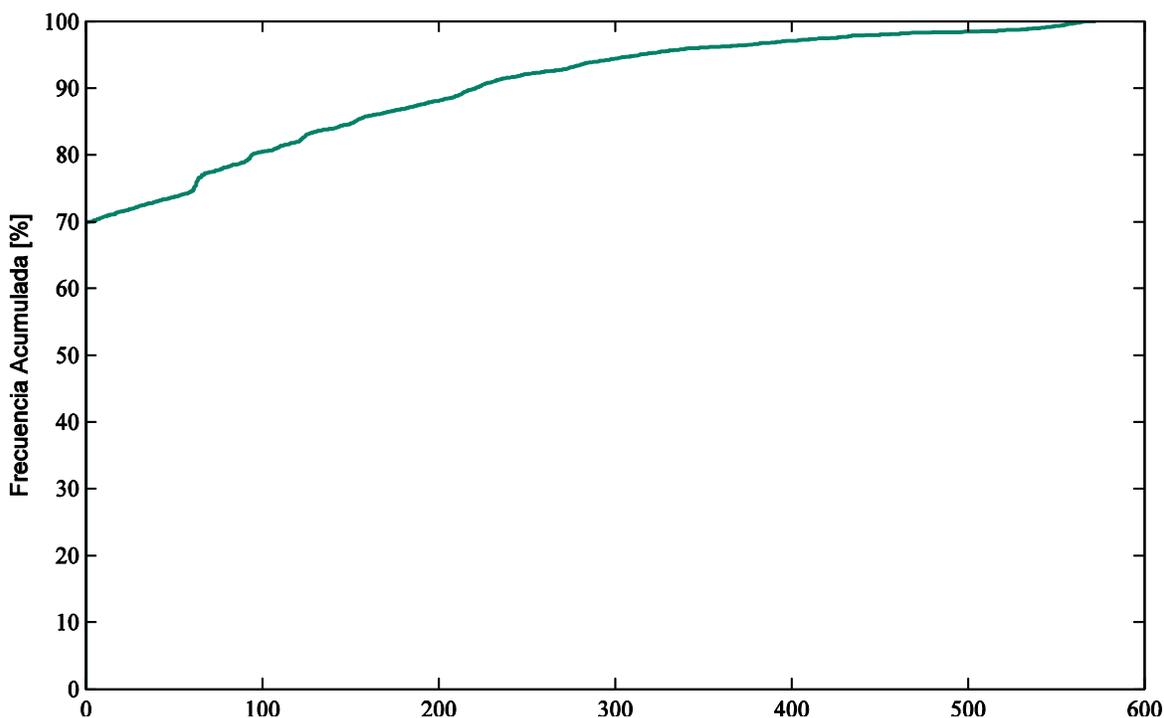
El periodo húmedo se considerará desde mayo a septiembre y el resto de los meses serán parte del periodo seco. Esta separación se realiza producto de que Rapel tiene una operación prácticamente nula la mayor parte de los meses del periodo seco (enero, febrero y diciembre) y una operación baja el resto de los meses en comparación con los meses considerados en el periodo húmedo, lo que genera valores de los IAHI en su mayoría nulos.

Para determinar los IAHI para cada restricción es necesario conocer la serie temporal de caudales horarios entregados por el modelo MIPUC. A partir éstos, mediante la utilización de las ecuaciones descritas en el Capítulo 2.2, es posible obtener un valor para cada indicador por día, por lo que se obtienen 365 valores para cada indicador. Con el fin de determinar cuál o cuáles de los casos disminuyen la alteración hidrológica, se utilizan curvas de frecuencia acumulada para cada indicador y se observarán series temporales de caudales.

#### 4.2. Caudal Mínimo de Operación ( $Q_{\text{mín}}$ )

La restricción de caudal mínimo busca imponer un caudal horario mínimo turbinado, de manera de asegurar un flujo mínimo aguas abajo de central hidroeléctrica. Para simplificar la aplicación de las restricciones se trabajará con una serie de valores constantes para todo el periodo de análisis, lo que permite posteriormente analizar de manera conjunta las restricciones tanto de caudal mínimo como de fluctuación máxima horaria.

Una manera de determinar los valores de caudal mínimo es mediante un análisis de frecuencia de los registros de caudales horarios turbinados registrados por el CDEC-SIC durante el periodo de estudio (año 2011). Otra manera de determinar caudales mínimos en la operación de la central, es mediante los criterios de determinación de caudal ecológico establecidos en el Código de Aguas (Art. 129 bis 1), en donde se establece el caudal ecológico mínimo como un 20% del caudal medio mensual y un máximo de un 20% del caudal medio anual. A partir de los datos de caudales medios mensuales afluentes ( Figura 4.1) es posible determinar el 20% del caudal medio mensual de cada mes, en donde se obtiene que el menor valor corresponde a 2 m<sup>3</sup>/s asociado al mes de enero y febrero y el mayor a 40 m<sup>3</sup>/s asociado al mes de septiembre. Dentro de este rango de valores se determinarán los caudales mínimos aplicados en la operación, producto de que establecer restricciones con valores de caudales mínimos muy altos no tiene sentido, ya que obligarían a la central a funcionar de manera constante incluso en el periodo húmedo, que es en donde hay mayor disponibilidad del recurso.



**Figura 4.2.- Frecuencia Acumulada del caudal de operación horario de Rapel durante. Periodo año 2011.**

A partir de la Figura 4.2, se puede ver que cerca de un 70% del tiempo la operación de la central es nula, por lo que una restricción suave de caudal mínimo va a representar un cambio en la operación de la central y una posible mejora en los IAHI, dado que a pesar de que las fluctuaciones intrahorarias puedan seguir siendo nulas, la sumatoria de los caudales aumentará y a la vez es posible que disminuya la diferencia entre el caudal máximo y el caudal mínimo.

De la frecuencia acumulada de caudales de operación horaria se obtiene que un 70% del tiempo la operación es mayor que cero y un 74% es menor de 40 [m<sup>3</sup>/s], por lo que se tomarán 5 valores de caudal mínimo que se encuentren en este rango.

<b>Restricción Q mínimo</b>		
<b>Caso</b>	<b>Qmín [m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>Frecuencia Acumulada [%]</b>
Qmín2	2	70
Qmín8	8	70.5
Qmín16	16	71
Qmín30	30	72
Qmín40	40	73

**Tabla 4.1.- Valores de caudales mínimos de operación.**

Mientras mayor es el valor del caudal mínimo impuesto más restrictivo es el caso y se esperan valores menores para los indicadores y por ende menor alteración hidrológica. En términos prácticos la restricción de caudal mínimo se introduce directamente en los datos de entrada del MIPUC, como una restricción de potencia mínima de la central Rapel.

### **4.3. Fluctuación Máxima Horaria de Operación ( $\Delta Q_{\text{máx}}$ )**

La restricción de fluctuación máxima horaria de operación tiene como objetivo disminuir la diferencia del caudal turbinado entre una hora y otra de manera de restringir los saltos que se aprecian en la operación de Rapel y evitar los efectos adversos que este tipo de generación puede producir.

Una manera de determinar los valores a usar es mediante un análisis de frecuencia de las variaciones de caudal entre horas consecutivas registradas durante el periodo de estudio lo que permite tener una noción del rango de variación de las fluctuaciones.

De la Figura 4.3, se puede observar que el 90% tiempo la variación de caudales en horas consecutivas es menor a 50 m<sup>3</sup>/s y dentro de este rango un 78% de los valores registrados son nulos, lo que se debe principalmente a que en los meses estivales la mayor parte del tiempo no hay generación de energía y durante el resto del año el funcionamiento de la central es sólo durante unas horas al día. Estos valores son consistentes con los observados en la Figura 4.2, donde un 70% del tiempo la central no opera, por lo que no se deben tener fluctuaciones ese mismo porcentaje de tiempo.

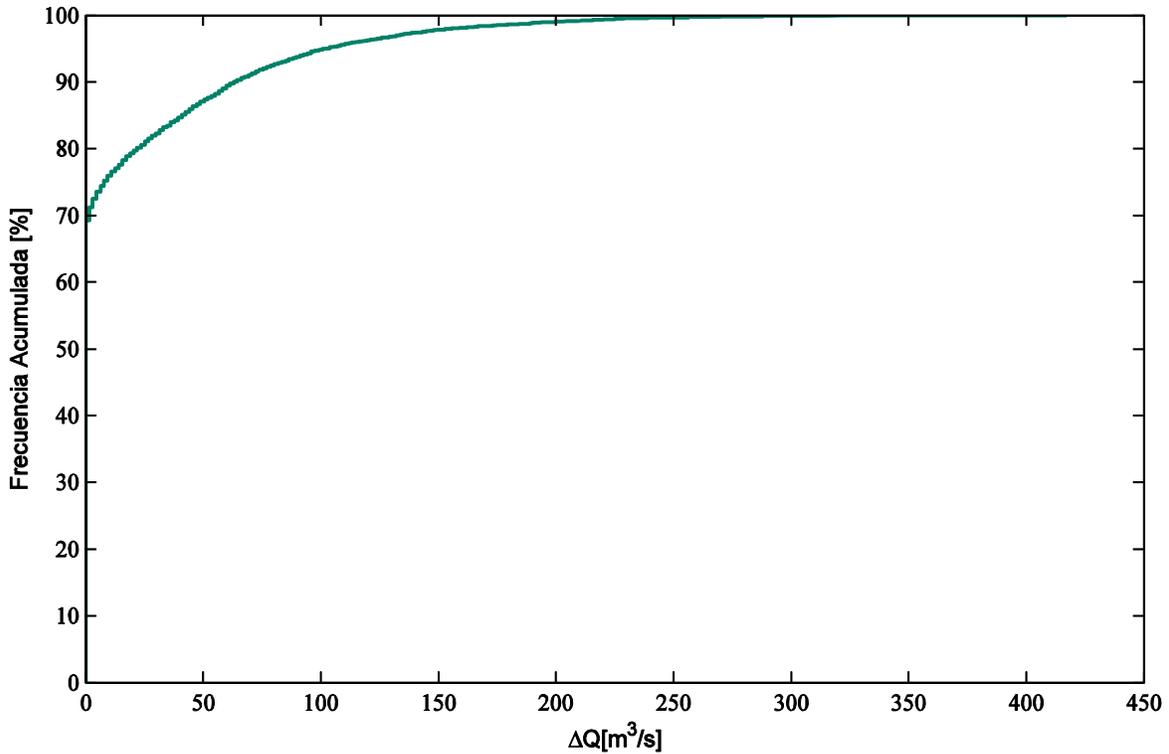


Figura 4.3.-Frecuencia acumulada de las variaciones intradiarias de caudal en la operación de Rapel.

De la Figura 4.3, se observa que un 95% del tiempo la fluctuación horaria es menor a 100 m<sup>3</sup>/s, por lo que valores de fluctuaciones horarias mayores a 100 m<sup>3</sup>/s (casos menos restrictivos) van a generar operaciones similares al caso sin restricción por lo que no serían una mejora real al sistema. Los valores que se utilizarán se muestran en la Tabla 4.2.-.

Restricción $\Delta Q$ [m <sup>3</sup> /s]		
Caso	$\Delta Q$ [m <sup>3</sup> /s]	% Q <sub>máx</sub> Generable
$\Delta Q100$	100	17%
$\Delta Q50$	50	9%
$\Delta Q25$	25	4%
$\Delta Q10$	10	2%
$\Delta Q5$	5	1%

Tabla 4.2.-Valores para la restricción de fluctuación máxima horaria.

En términos prácticos esta restricción se aplica directamente en el MIPUC en donde se define un valor máximo para la variación de caudales en horas consecutivas, este valor se define en las planillas de entrada del MIPUC donde se describen las características de operación de las centrales.

#### **4.4. Caudal Mínimo y Fluctuación Máxima Horaria de Operación**

Las restricciones descritas anteriormente están enfocadas en disminuir los principales efectos de la operación por *hydropeaking* del embalse Rapel; la fluctuación de los caudales que se tiene aguas abajo en el punto de restitución y la ausencia de un caudal mínimo que permita las condiciones básicas para mantener el ecosistema existente en el cauce en su estado natural (caudal ecológico). Al aplicar estas restricciones por sí solas se puede dar el caso de que tengan que ser demasiado restrictivas para generar una mejora en los IAHI lo que puede llegar a alterar la operación de Rapel y su capacidad de responder rápidamente a las demandas energéticas y funcionar sólo en horas punta. Producto de esto se consideran combinaciones de las restricciones de manera de alterar lo menos posible la operación y obtener mejoras en los IAHI.

A partir de los resultados obtenidos en términos de los IAHI de cada restricción por sí sola, se determinarán cuales combinaciones tiene sentido aplicar.

#### **4.5. Aplicación del Modelo MIPUC**

El modelo MIPUC utiliza como dato de entrada, entre otras cosas las condiciones reales observadas de los volúmenes de los embalses, los que son usados como inputs del sistema. Entre semanas consecutivas no necesariamente coinciden las condiciones finales de volúmenes estimados a partir de la operación programada con los volúmenes reales de los embalses, esto producto de la incertidumbre que se tiene en la demanda e hidrología, lo que genera una variación entre la operación programada y la real. Por esta razón al aplicar restricciones en la operación a semanas de manera independiente sin considerar la variación de volúmenes producto de la operación impuesta, se pueden estar considerando volúmenes que no representan realmente la disponibilidad del embalse lo que puede llevar a extraer más agua de la que realmente hay disponible, razón por la cual para es necesario implementar el modelo de manera continua, es decir, actualizando los volúmenes finales de la etapa  $t$ , como los volúmenes iniciales de la etapa  $t+1$ . Esta modificación del modelo MIPUC (modelo MIPUC Continuo), se implementa mediante la utilización del modelo MIPUC y MATLAB, donde este último permite actualizar de automáticamente el volumen final de una etapa como el volumen inicial de la etapa siguiente. Esta actualización se realiza para los 10 embalses que operan en el SIC, estos son: Cipreses, Pehuenche, Colbún, Machitura, El Toro, Polcura, Rapel, Canutillar, Ralco y Pangué, para los cuales además de la actualización de volúmenes se varían los rendimientos de las centrales dado que se tienen nuevas condiciones iniciales. Para determinar la relación entre volumen inicial y rendimiento, se utilizaron los datos disponibles en el modelo MIPUC para la situación real a partir de los que se obtiene una función lineal entre ambos parámetros.

Aplicando el modelo MIPUC Continuo a la operación del año 2011, en término de los indicadores, se observa un comportamiento similar entre la operación real y programada registradas en el CDEC-SIC y la operación obtenida a partir del modelo MIPUC Continuo (Figura 4.4), en donde la curva del modelo MIPUC Continuo genera más alteraciones que la operación programada por el CDEC-SIC pero menos que la operación real del sistema,

por lo que al considerar este modelo no se están generando alteraciones ni peores ni mejores que las asociadas a los casos del CDEC-SIC.

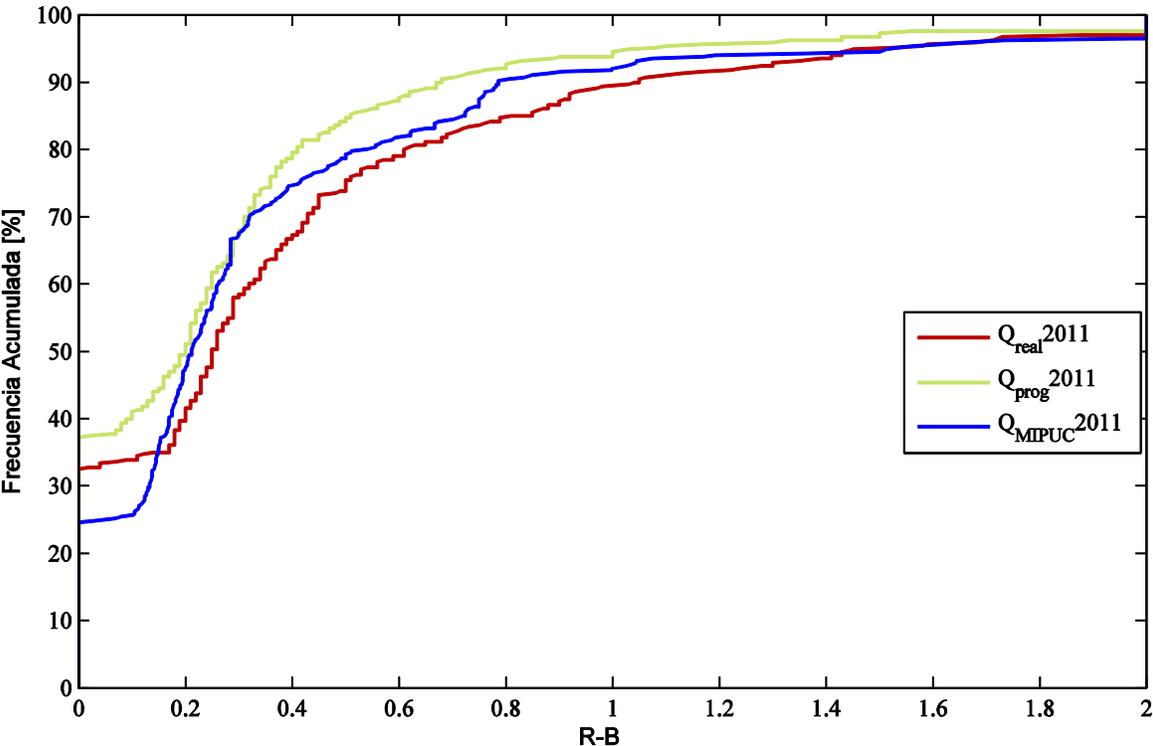


Figura 4.4.- Indicador R-B. Año 2011 operación real, programada y la obtenida a partir del modelo MIPUC Continuo.

## 5. ALTERACIÓN RÉGIMEN HIDROLÓGICO

### 5.1. Indicadores de Alteración Hidrológica Intradiarias (IAHI)

Para determinar los IAHI para cada restricción es necesario conocer la serie temporal de caudales horarios (o potencia horaria generada) entregados por el modelo MIPUC, a partir de las cuales mediante la utilización de las ecuaciones descritas en el Capítulo 2.2, es posible obtener un valor para cada indicador.

Para simplificar los análisis de los resultados se mostrarán sólo los gráficos del indicador R-B, esto producto de que el comportamiento entre los indicadores es similar para el mismo periodo de tiempo. El resto de los gráficos se adjuntan en el ANEXO B.

Los resultados de los indicadores obtenidos al aplicar las distintas restricciones se compararán tomando como caso base la operación programada de Rapel obtenida del modelo MIPUC Continuo sin restricciones (Caso Base). La razón de tomar este escenario como caso base y no la operación real del 2011 de la central es que al aplicar las restricciones a la operación en el modelo MIPUC, se obtienen operaciones programadas y no reales y dadas las diferencias entre ambas vistas en el Capítulo 3.3, no tiene sentido comparar directamente operación programada con real.

En término de los IAHI si al aplicar restricciones a la operación se obtienen resultados mejores que los asociados a la operación programada a la vez se estará mejorando la alteración producida por la operación real, ya que como se vio en el Capítulo 3.3.1, esta última tiene valores peores para los indicadores que la operación programada.

#### 5.1.1. Restricción Caudal Mínimo ( $Q_{\min}$ )

A partir de la Figura 5.1 se puede observar que la restricción de caudal mínimo genera una menor alteración hidrológica en comparación al Caso Base, en donde a mayor caudal mínimo impuesto mayor cantidad de indicadores nulos (valores en el eje de las ordenadas).

En los 3 indicadores se repite la cantidad de valores que se encuentran sobre el eje y, esto quiere decir que la operación se mantiene constante y no se tienen fluctuaciones horarias ni diferencias entre un valor máximo y mínimo en un día, por lo que la central se encuentra operando días completos al caudal mínimo impuesto, llegando para el caso de la restricción de caudal mínimo  $40 \text{ m}^3/\text{s}$  a operar aproximadamente 140 días sin presentar fluctuaciones ni variaciones en la generación para las horas de mayores demandas energéticas, eliminando así parte del *hydropeaking* característico de la central Rapel.

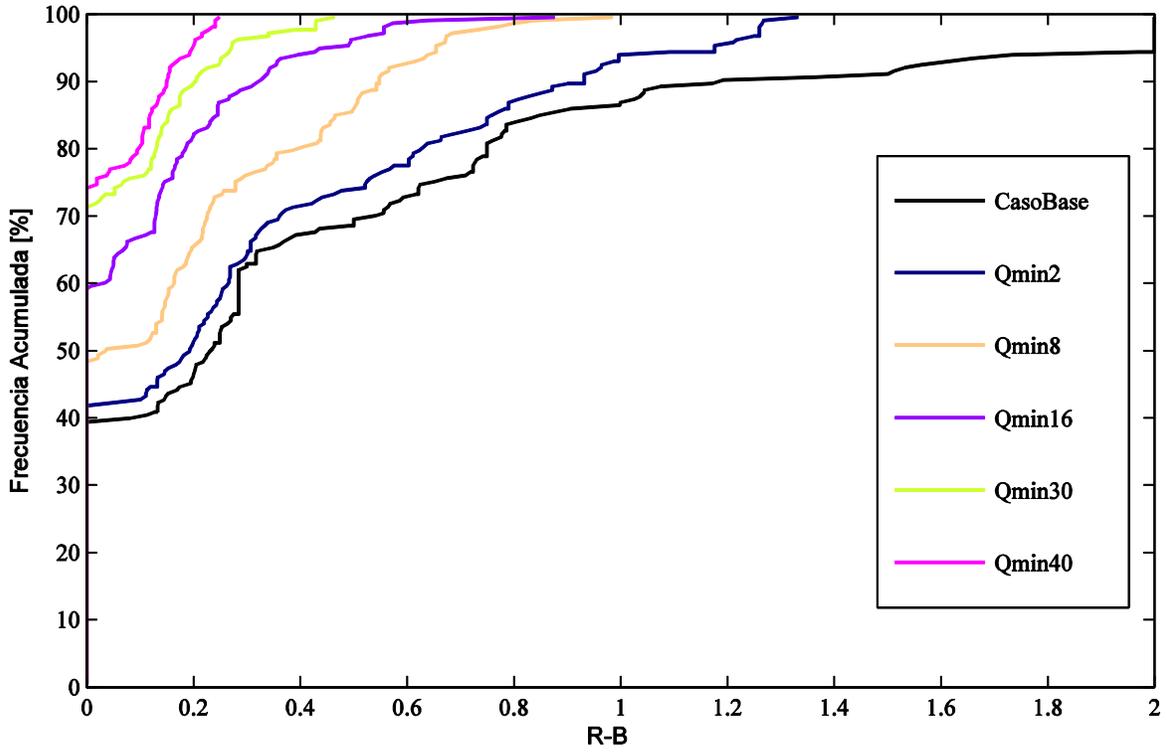


Figura 5.1.- Indicador R-B, Período Seco. Restricciones Caudal Mínimo.

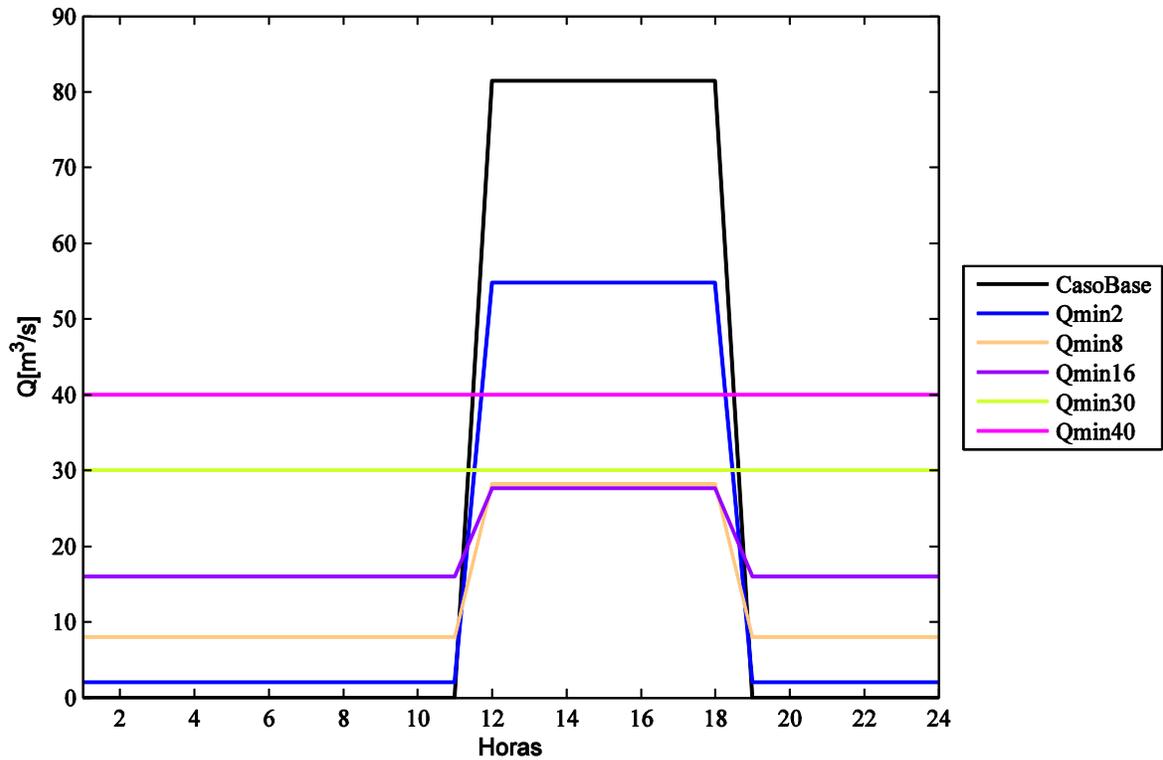


Figura 5.2.- Operación 5 enero 2011. Restricción caudal mínimo.

Al analizar lo que sucede durante los días donde se registran valores distintos de cero para los indicadores, se observa que la central opera de manera continua y en las horas de mayores demandas energéticas (entre las 11-21 horas) aumenta su caudal turbinado como un bloque. En la Figura 5.2 se observa que ninguna restricción supera el máximo de caudal generado por la central para el caso sin restricción ( $80 \text{ m}^3/\text{s}$ ) y mientras menor es el caudal mínimo ( $Q_{\text{mín}} 2, 8 \text{ y } 16 \text{ m}^3/\text{s}$ ) impuesto mayor es el *peak* de caudal que se alcanza. Para valores altos de la restricción,  $Q_{\text{mín}} 30 \text{ y } 40 \text{ m}^3/\text{s}$  la central opera al caudal mínimo impuesto sin presentar fluctuaciones, en donde la cantidad de agua vertida supera a la utilizada por el caso base. Este tipo de funcionamiento de la central es predominante para el periodo seco, además se observan situaciones en donde producto de que hay mayores demandas y disponibilidad del recurso, se tiene que las condiciones menos restrictivas (caudal mínimo  $2, 8 \text{ y } 16 \text{ m}^3/\text{s}$ ) logran operar satisfaciendo los mismos máximos que los observados para la operación base, sólo que tienen un piso mayor de operación dependiendo del caudal mínimo impuesto, ver Figura 5.3.

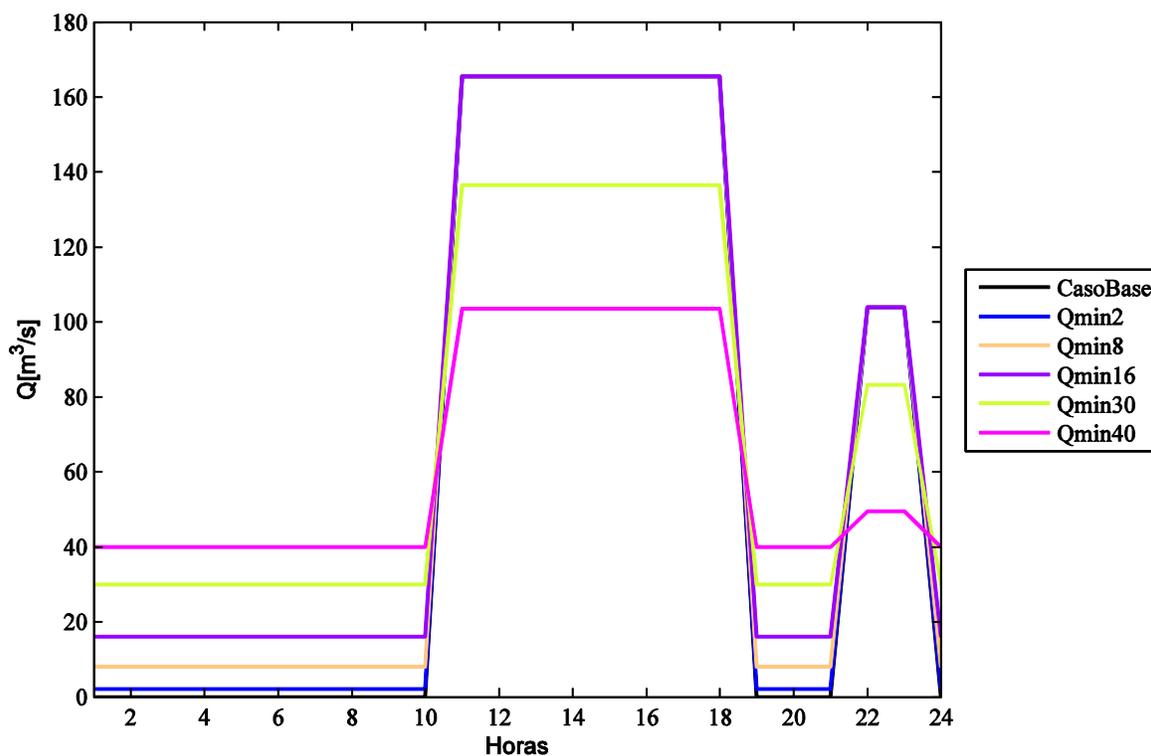


Figura 5.3.-Operación 6 diciembre 2011. Restricción caudal mínimo.

Para el periodo húmedo al igual que para periodo seco se tiene que mientras mayor es el caudal mínimo menor es la alteración hidrológica observada. En estos meses se observa que la central se encuentra la mayor parte de los días operando (más de un 70%) y al igual que en el periodo seco mientras mayor es la restricción hay más días donde la central opera de manera constante al caudal mínimo impuesto. En este periodo se tienen mayores fluctuaciones de caudales en comparación al periodo seco, producto de esto la restricción de caudal mínimo  $2 \text{ m}^3/\text{s}$  tiene un comportamiento muy similar al caso base y el caso más restrictivo no obliga a la central a operar de manera constante ya que para este periodo se alcanzan valores de potencia generada más altas que las registradas en el periodo seco y se tiene mayor volumen de agua disponible para la generación.

A escala diaria se observa que ninguna restricción supera los caudales turbinados máximos del Caso Base y en las restricciones que son muy altas producto de que tienen un piso de operación más elevado que el caso base tienden a tener menores valores de caudales máximos generados para no usar un volumen mucho mayor que del Caso Base, de manera que el sistema tiende a redistribuir el agua disponible para el Caso Base para el resto de los casos.

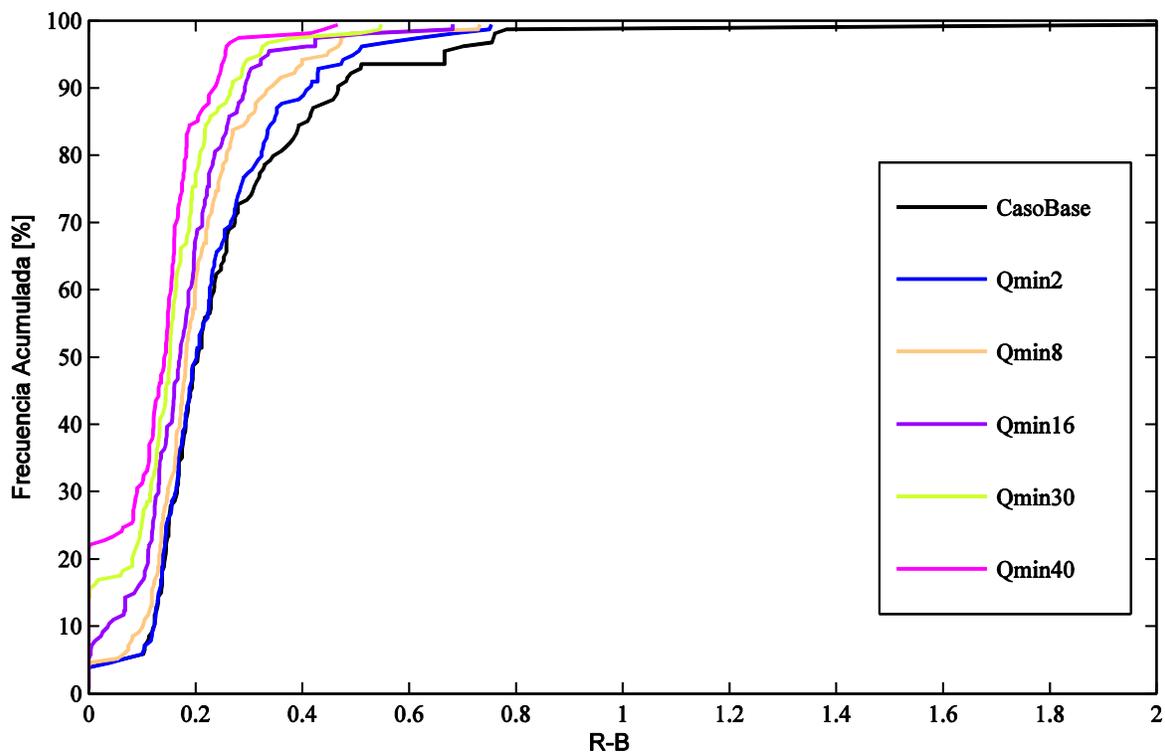


Figura 5.4.-Indicador R-B, Período Húmedo. Restricción Caudal Mínimo.

Con la restricción de caudal mínimo de operación es posible mejorar los indicadores de alteración hidrológica, pero se debe tener en consideración que el caudal mínimo no puede ser tan alto para así evitar que la central entre en un funcionamiento continuo utilizando un volumen de agua considerablemente mayor al disponible para el Caso Base y se pierda su capacidad de responder frente a los *peaks* de demandas energéticas.

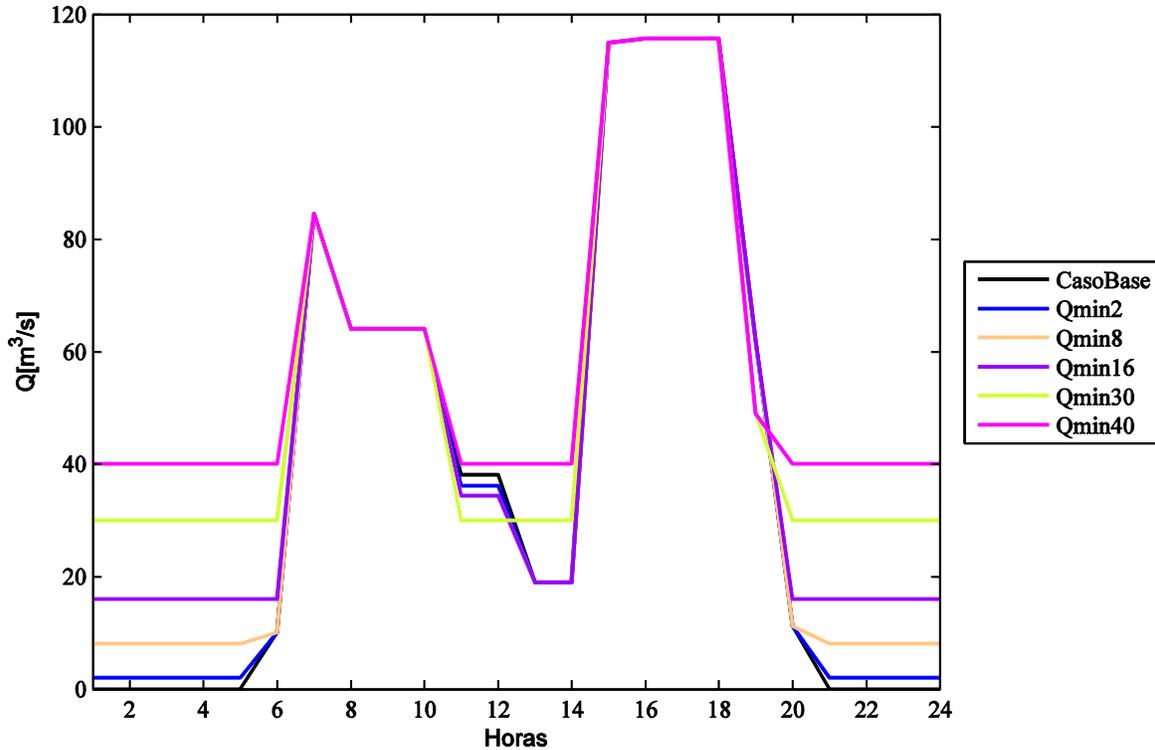


Figura 5.5.- Operación horaria 30 julio 2011. Restricciones caudal mínimo.

Para poder comparar los todos los indicadores asociados a las distintas restricciones impuestas, se tomará un valor representativo de cada indicador para las operaciones simuladas para todo el año 2011, el que será un promedio de los indicadores dentro de cierto rango de frecuencia. Para determinar el rango de frecuencia relevante se toma como referencia el estudio realizado por Fernández (2012), el que considera un rango de frecuencia representativo entre el 5 y el 95%. Producto de que en este caso en el Caso Base se tienen valores nulos de los indicadores que pueden ser producto de que la central no se encuentra operando o dado que se encuentra operando de manera constante, el porcentaje de frecuencia acumulada que se considerará será a partir de un 20% de la frecuencia acumulada, porcentaje a partir del cual el Caso Base comienza a tener valores distintos de cero, hasta el 95% (Promedio<sub>20%-95%</sub> de ahora en adelante). Los valores representativos de las restricciones de caudal mínimo para indicador se muestran en la Figura 5.6, donde se muestra que a medida aumenta la restricción de caudal mínimo menores son los valores asociados a cada indicador.

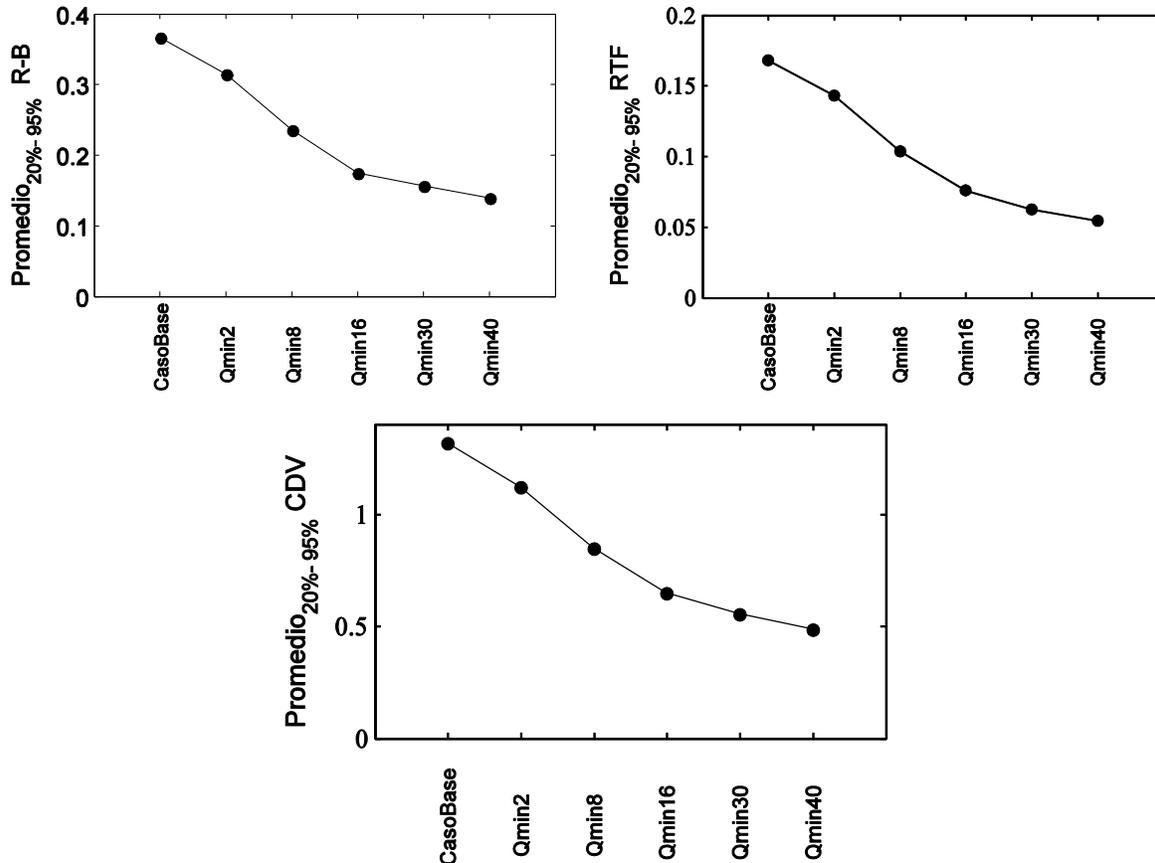


Figura 5.6.- Valores representativos para los indicadores, restricciones Qmín. Periodo 2011.

### 5.1.2. Restricción Fluctuación Máxima Horaria de Operación ( $\Delta Q_{\text{máx}}$ )

Al aplicar la restricción de fluctuaciones máximas para el periodo seco, no se aprecia una mejora notoria para todos los casos simulados con respecto a la operación base. Esta restricción por sí sola tiene asociada fluctuaciones mayores que la de caudal mínimo y no obliga a la central a operar de manera constante razón por la cual se tiene un número similar de días para todos los casos en donde los indicadores son nulos.

El caso menos restrictivo ( $\Delta Q_{\text{máx}} 100 \text{ m}^3/\text{s}$ ) es similar a la operación programada por el MIPUC, ya que como se vio en la Figura 3.8, aproximadamente el 95% del tiempo la fluctuación horaria es menor a  $100 \text{ m}^3/\text{s}$  por lo que esta restricción se encuentra inactiva la mayor parte del tiempo. Los casos más limitantes ( $\Delta Q_{\text{máx}} 5$  y  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ ) se comportan de manera similar disminuyendo los valores de los indicadores de la alteración hidrológica al impedir que se tengan para el caso del indicador R-B grandes fluctuaciones entre horas consecutivas.

Las restricciones de fluctuaciones máximas horarias generan valores mayores para los indicadores para el periodo seco (alcanzando incluso los valores del Caso Base) en comparación a los resultados obtenidos al aplicar las restricciones de caudal mínimo.

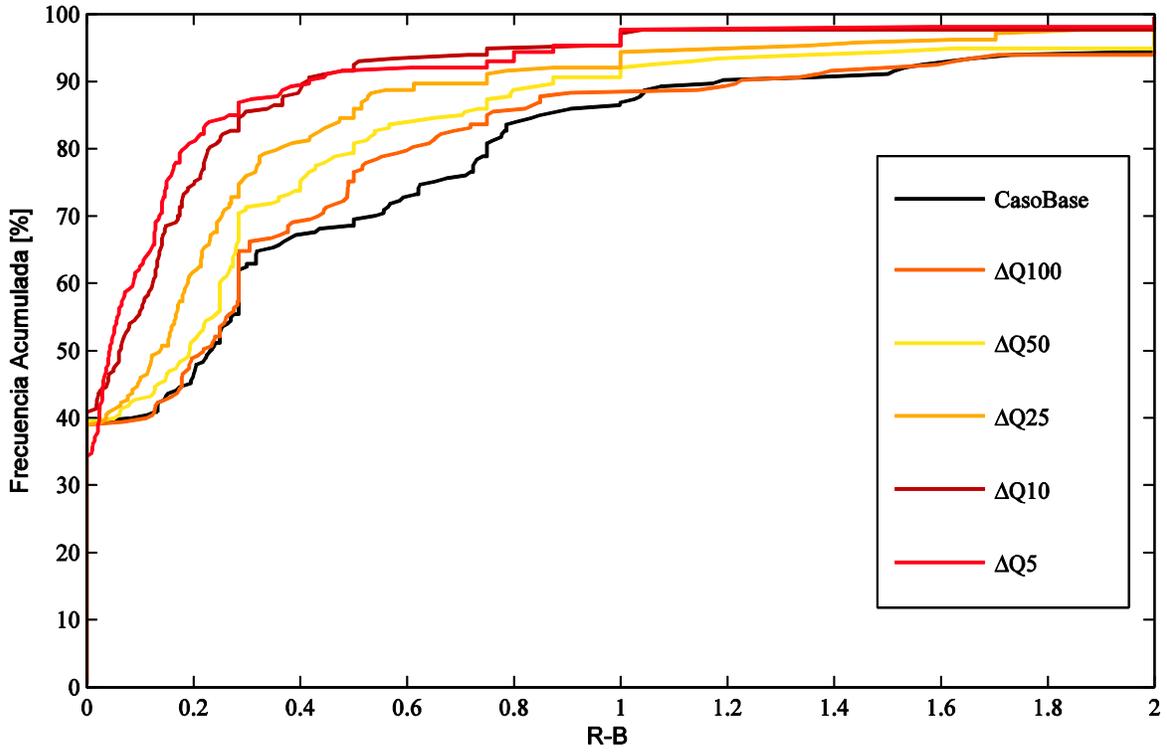


Figura 5.7.-Indicador R-B, Período Seco. Restricción Fluctuación Máxima Horaria de Caudal.

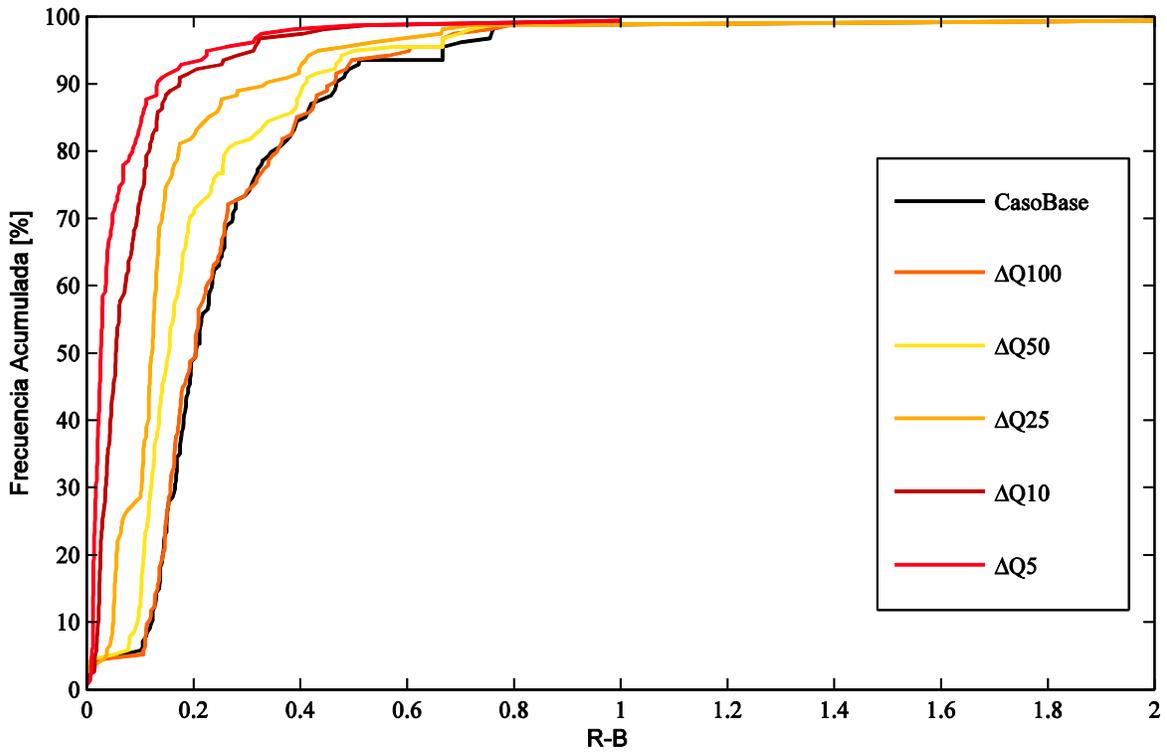


Figura 5.8.- Indicador R-B, Período Húmedo. Restricción Máxima Horaria de Caudal.

Para el periodo húmedo se tienen menos días en donde no opera y se repite la similitud entre el Caso Base y la restricción  $\Delta Q_{\text{máx}} 100$  y entre  $\Delta Q_{\text{máx}} 5$  y  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ . Dado el comportamiento similar de estos últimos cuatro casos se pueden asociar en sólo dos;  $\Delta Q_{\text{máx}} 100$  y entre  $\Delta Q_{\text{máx}} 5 \text{ m}^3/\text{s}$ , los que generan menores valores para los IAHI con respecto a los otros dos casos. Al aplicar esta operación se está forzando a la central a limitar su capacidad de variar su generación en un periodo corto de horas, por lo que para alcanzar los *peaks* de demanda que se tienen para el Caso Base la central debe comenzar a operar anticipadamente para no infringir la limitación horaria impuesta y poder satisfacer las demandas energéticas. Este efecto se puede ver en la Figura 5.9, en donde las restricciones que limitan menos las fluctuaciones logran alcanzar los valores máximos de operación registrados para el Caso Base (en la Figura 5.9 se tiene que la operación producida por la restricción  $\Delta Q_{100}$  es la misma que la obtenida en el Caso Base) y aquellos que son más restrictivos comienzan a operar antes de las demandas máximas elevando su piso de operación mientras la restricción se lo permite hasta alcanzar un máximo, que no coincide necesariamente con los del Caso Base ya que la optimización tiende a entregar el mismo volumen de agua redistribuyendo el volumen disponible.

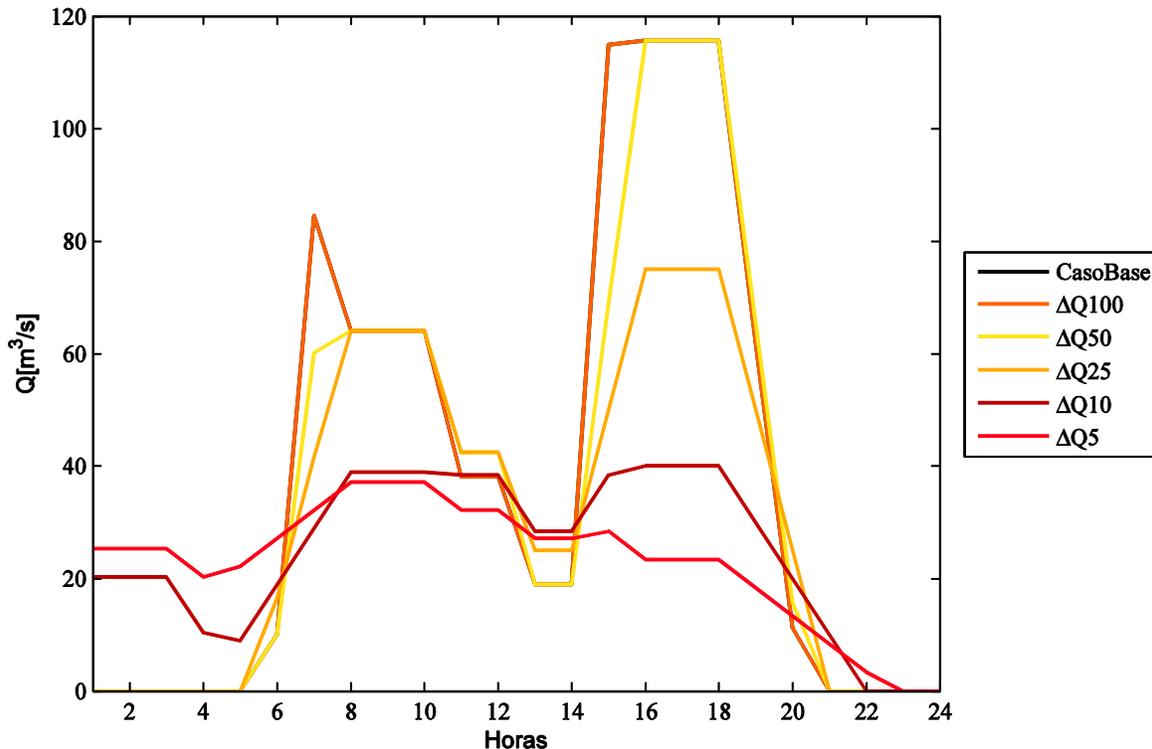


Figura 5.9.- Operación 30 julio 2011. Restricción fluctuación máxima horaria.

A partir del promedio de los indicadores que se encuentran entre el 20 y el 95% de la frecuencia acumulada (Figura 5.10), se observa la tendencia en donde a mayor restricción de fluctuación horaria se obtienen mejoras para los indicadores con respecto al Caso Base.

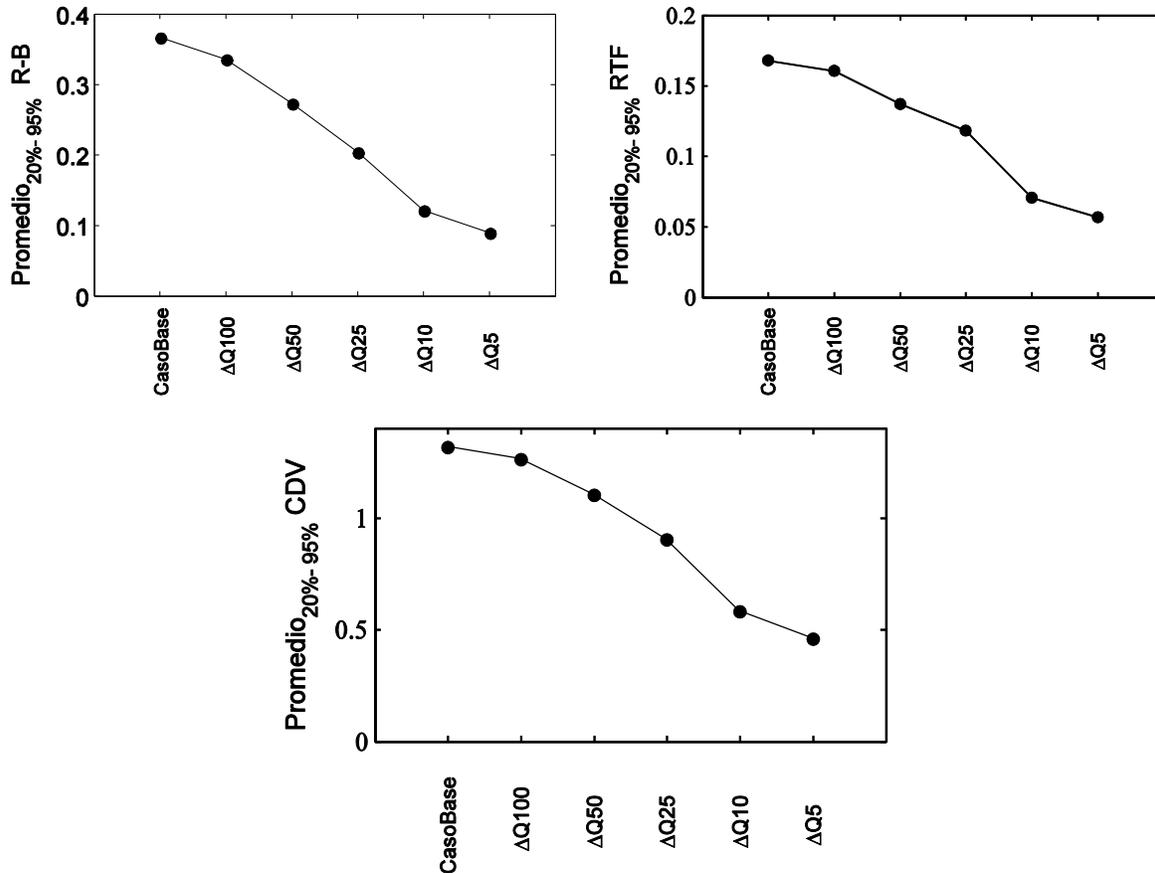


Figura 5.10.- Valores representativos para los indicadores, restricciones  $\Delta Q_{\text{máx}}$ . Periodo 2011.

Al analizar por separado el efecto de las restricciones de  $Q_{\text{mín}}$  y  $\Delta Q_{\text{máx}}$  se obtienen diferentes efectos en los indicadores según el periodo analizado. En el periodo seco las restricciones de caudal mínimo generan curvas de duración más cercanas al eje de las ordenadas en comparación a las obtenidas al aplicar restricciones de fluctuaciones máximas horarias. Las restricciones de fluctuaciones máximas horarias generan curvas con valores nulos similares a los obtenidos a partir del Caso Base mientras que las restricciones de caudales mínimos generan mayores valores nulos mientras mayor es el caudal mínimo impuesto, esto producto de que al tener menor recurso hídrico disponible en este periodo se obliga a la central a operar de manera constante, resultando así más efectivo restringir el caudal mínimo que las fluctuaciones horarias para este periodo. En el periodo húmedo las restricciones de fluctuaciones máximas horarias son las que generan curvas con valores menores para los indicadores, esto producto de que las restricciones de caudal mínimo para este periodo no son tan limitante como en el periodo seco ya que al existir mayor recurso de agua a pesar de imponer un caudal mínimo la central tiene a tener fluctuaciones horarias, por lo que las restricciones de  $\Delta Q_{\text{máx}}$  son las que realmente restringen a la operación y son las que generan valores menores para los 3 indicadores utilizados.

### 5.1.3. Restricción Caudal Mínimo y Restricción Fluctuación Máxima Horaria de Operación

Producto de la similitud que se aprecia en los indicadores de variación máxima horaria se descartará el caso de fluctuación máxima de 100 y 10 m<sup>3</sup>/s dada la similitud que tiene la primera restricción con el Caso Base y la segunda con la restricción  $\Delta Q$  5 m<sup>3</sup>/s. Para las restricciones de caudales mínimos no se considerará el caso 40 m<sup>3</sup>/s al ser muy restrictivo y entregar resultados similares a los obtenidos a partir de la restricción de Qmín 30 m<sup>3</sup>/s. Las combinaciones que se utilizarán se muestran en la Tabla 5.1.-.

Casos		$\Delta Q$ máximo [m <sup>3</sup> /s]		
		50	25	5
Qmín [m <sup>3</sup> /s]	2	Qmín2- $\Delta Q$ 50	Qmín2- $\Delta Q$ 25	Qmín2- $\Delta Q$ 5
	8	Qmín8- $\Delta Q$ 50	Qmín8- $\Delta Q$ 25	Qmín8- $\Delta Q$ 5
	16	Qmín16- $\Delta Q$ 50	Qmín16- $\Delta Q$ 25	Qmín16- $\Delta Q$ 5
	30	Qmín30- $\Delta Q$ 50	Qmín30- $\Delta Q$ 25	Qmín30- $\Delta Q$ 5

Tabla 5.1.- Restricciones Caudal Mínimo y Fluctuaciones de Caudales Combinadas.

La finalidad de aplicar las restricciones en conjunto es generar un menor impacto en la operación de la central mejorar los indicadores, ya que aplicarle restricciones de caudales mínimos muy altos o restringir demasiado las fluctuaciones horarias se está obligando a la central a operar todo el tiempo y/o a perder parte de su capacidad de responder a las variaciones que se producen en la demanda.

Para analizar las situaciones combinadas, se comparan casos con un Qmín constante y con  $\Delta Q$ máx variables y con Qmín variables y  $\Delta Q$ máx constante.

- Qmín constante  $\Delta Q$ máx variable

En la Figura 5.11, se observa que mientras más restrictiva es la fluctuación horaria menor es la alteración hidrológica asociada, esta situación se repite al analizar por separado cada caudal mínimo con las combinaciones de fluctuaciones horarias permitida tanto para el periodo seco como para el periodo húmedo.

El efecto de combinar estas restricciones en la generación horaria se traduce como una mezcla de las series temporales de operación detalladas en las Secciones 5.1.1 y 5.1.2, donde para este caso se tiene que el piso mínimo de operación se mantiene constante y dependiendo de la fluctuación permitida se alcanzan los máximos de operación de la situación base ( $\Delta Q$ máx menos restrictivos) o la operación tenderá a bajar sus máximos de generación pero a presentar fluctuaciones antes de las horas *peaks* de demanda para poder aumentar paulatinamente su generación hasta llegar a las horas de mayor requerimiento

energético, respetando la variación máxima horaria permitida (casos  $\Delta Q_{\text{máx}}$  más restrictivos).

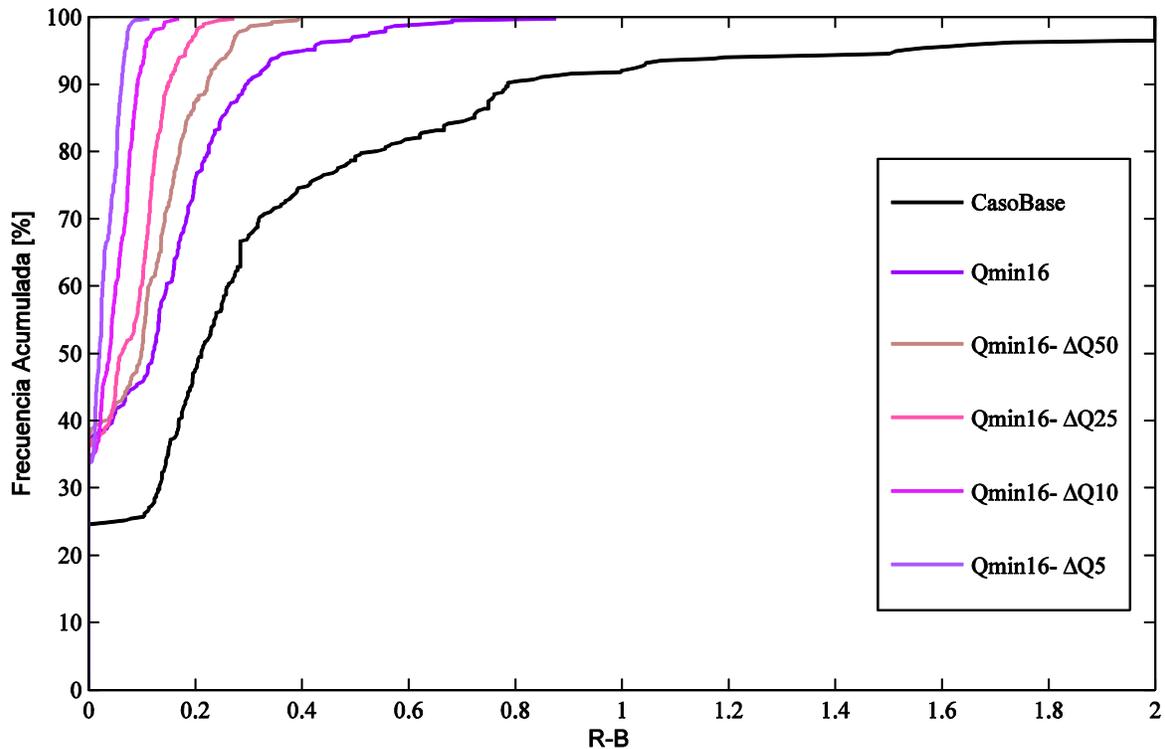


Figura 5.11.-Indicador R-B, año 2011. Caso  $Q_{\text{mín}} 16$   $\Delta Q_{\text{máx}}$  variable.

- $Q_{\text{mín}}$  variable  $\Delta Q_{\text{máx}}$  constante

Al dejar una fluctuación horaria constante y variar los caudales mínimos, se tiene que mientras mayor sea la restricción de caudal mínimo mejores son los indicadores de alteración hidrológica con respecto al caso donde se restringe solo la fluctuación horaria sola. Se tienen más días en los cuales la operación se mantiene constante y se alcanzan valores máximos menores para los indicadores. Este comportamiento se observa al hacer todas las combinaciones tanto para el periodo húmedo como para el periodo seco.

Al analizar de manera conjunta las restricciones combinadas resulta engorroso ver cuál es mejor sobre otra dado que hay intervalos en donde una restricción puede mejorar los indicadores con respecto a otra pero luego empeorarlos.

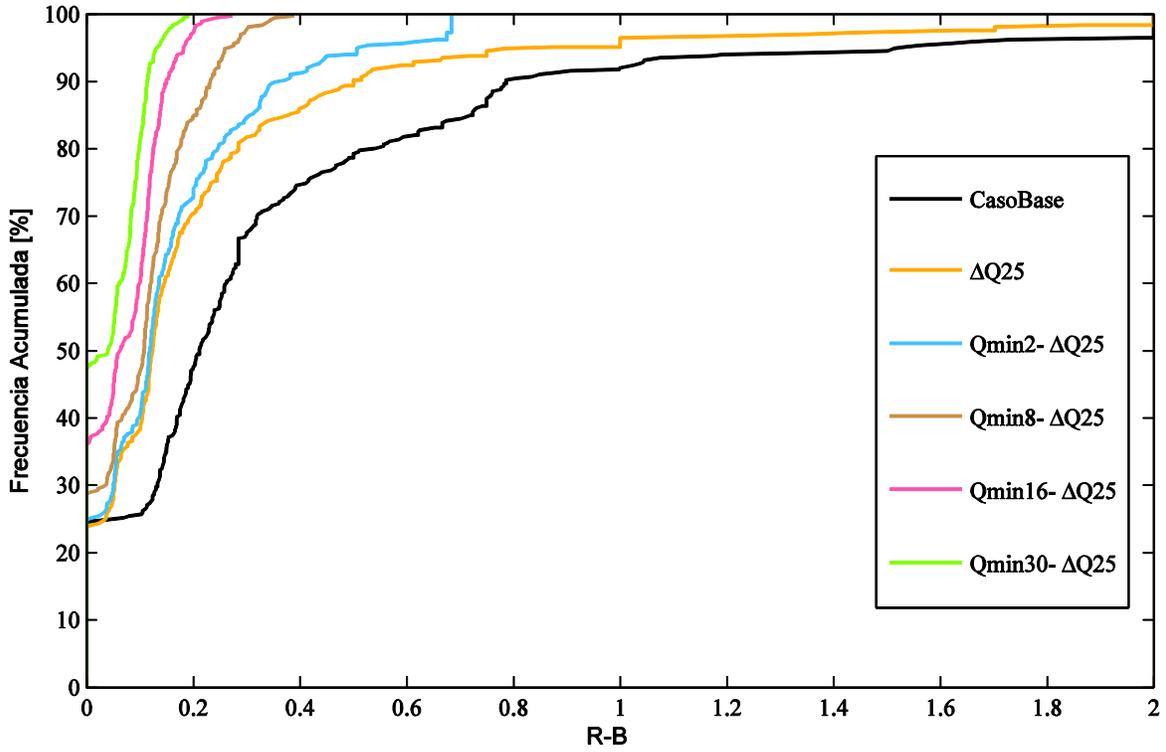


Figura 5.12.-Indicador R-B, año 2011. Caso  $Q_{\min}$  variable  $\Delta Q_{\max}$  25.

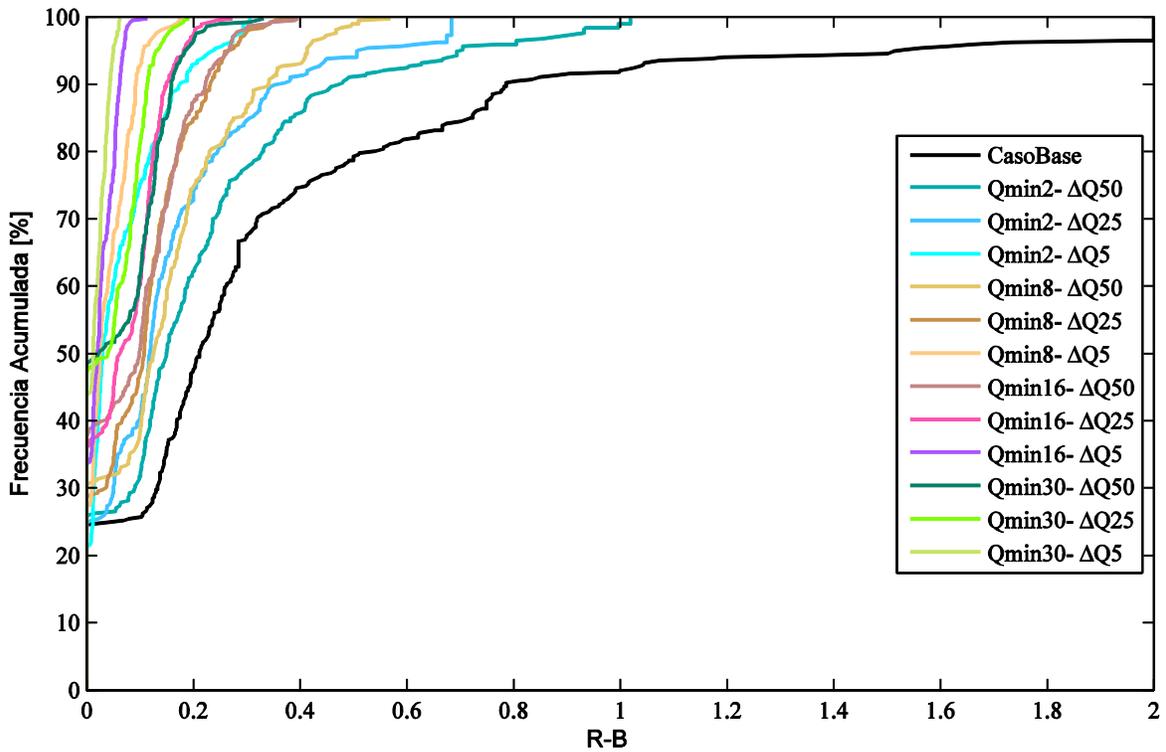


Figura 5.13.- Combinaciones de restricciones  $Q_{\min}$  y  $\Delta Q$ . Indicador R-B, periodo seco.

Dado que lo que se quiere evitar es tener valores altos de los indicadores entre dos restricciones que se cruzan resulta preferible un caso que disminuya los valores mayores de los indicadores que los menores. En la Figura 5.13, se puede ver que los casos menos restrictivos de peor a mejor son:  $Q_{\min 2} - \Delta Q_{\max 50}$ ,  $Q_{\min 2} - \Delta Q_{\max 25}$ ,  $Q_{\min 8} - \Delta Q_{\max 50}$ ,  $Q_{\min 8} - \Delta Q_{\max 25}$ , a partir de esos casos es posible determinar cuál es mejor que el otro para todos los valores del indicador. Al ver que es lo que ocurre con los casos de fluctuaciones más restrictivos se puede ver que se intersectan con algunas restricciones con valores de caudales mínimos pero con mayor libertad de variar entre horas, en donde por ejemplo para disminuir los valores altos de los indicadores es mejor operar con  $Q_{\min 8} - \Delta Q_{\max 5}$  que con  $Q_{\min 16} - \Delta Q_{\max 25}$  o incluso con  $Q_{\min 30} - \Delta Q_{\max 50}$  que es mejor que la anterior. Por lo que es mejor aplicar una restricción más permisiva con respecto al caudal mínimo y más estricta con respecto a las fluctuaciones al comparar las restricciones asociadas a caudales mínimos consecutivos.

Para el periodo húmedo se tienen casos en donde las curvas se cruzan más de una vez. En la Figura 5.14, se tienen curvas con valores similares en donde los mejores resultados se tienen para las restricciones que tienen asociadas una fluctuación máxima horaria de  $\Delta Q_5$   $m^3/s$ , esto producto de que en este periodo la central opera un porcentaje mayor del tiempo en comparación con el periodo seco y presenta mayores fluctuaciones horarias, por lo que esta restricción suele estar activa. Para las restricciones con una fluctuación horaria máxima de  $5 m^3/s$  y caudales mínimos variables, se observa que un 60% del tiempo las 4 restricciones ( $Q_{\min 2} - \Delta Q_5$ ,  $Q_{\min 8} - \Delta Q_5$ ,  $Q_{\min 16} - \Delta Q_5$  y  $Q_{\min 30} - \Delta Q_5$ ) tienen el mismo efectos en términos de la alteración hidrológica y posterior a ese rango dependiendo del caudal mínimo impuesto va a ser el comportamiento de las curvas. Para este periodo se observa que las restricciones que tienen la misma limitación de fluctuación horaria tienen una forma similar y se van corriendo hacia el eje de las ordenadas mientras mayor es el caudal mínimo impuesto.

Otra forma de comparar las distintas restricciones es a partir de las serie temporales de los IAHI, las que permiten comparar el valor diario de cada uno y verificar si una restricción es mejor para todos los valores sobre otra. En la Figura 5.15, se muestran los resultados de las series temporales del indicador R-B de 24 días del mes de abril. En términos generales no es posible determinar si una restricción es mejor sobre otra dado que las curvas se cruzan entre ellas pero se observa una tendencia en donde existe un aumento en los indicadores mientras menos restrictiva es la operación. Este mismo comportamiento se observa tanto en el periodo húmedo como en el seco en donde no se puede determinar para ninguna restricción si es mejor para todos los días con respecto a otra.

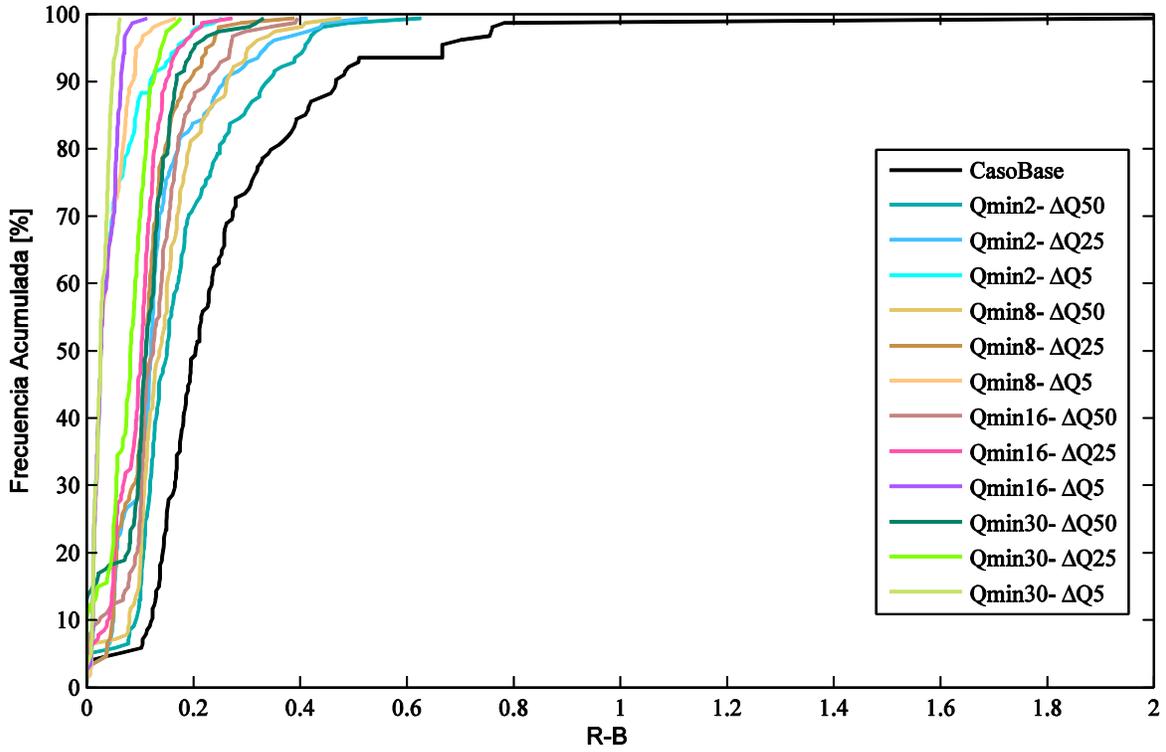


Figura 5.14.-Combinaciones de restricciones Q<sub>mín</sub> y ΔQ<sub>máx</sub>. Indicador R-B, periodo húmedo.

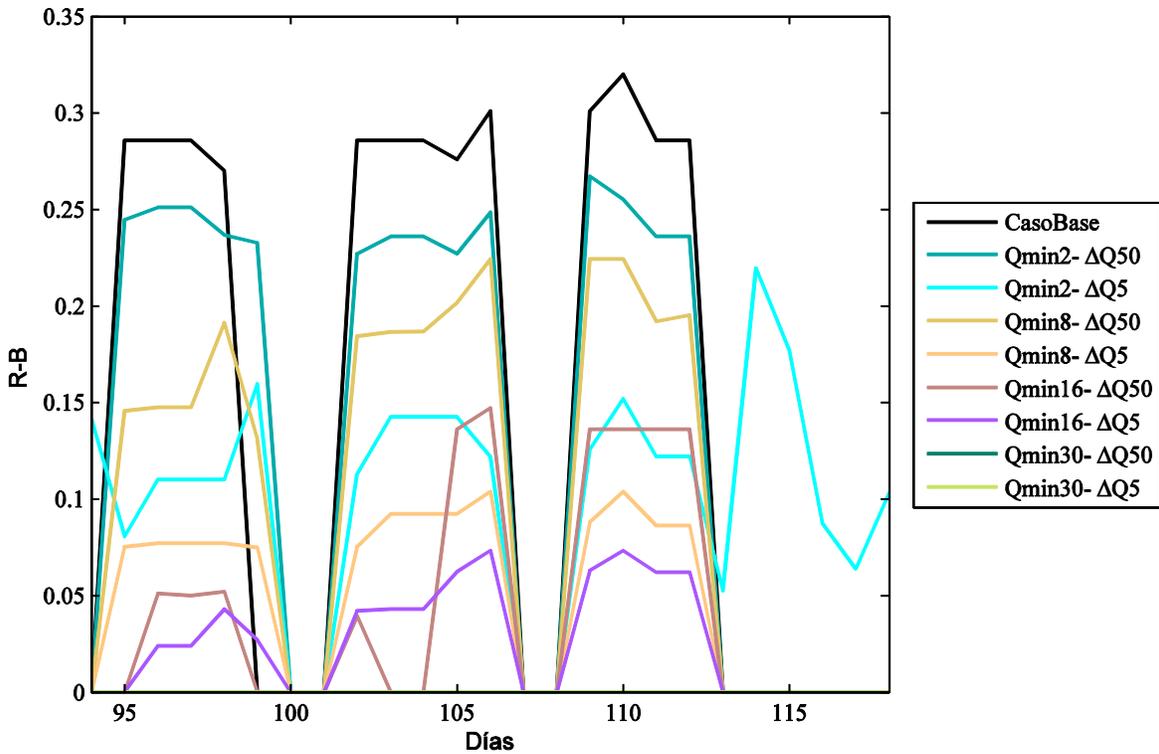


Figura 5.15.-Series Temporales Indicador R-B. Días 94 (4 abril) al 118 (28 abril).

A partir del Promedio<sub>20%-95%</sub> se pueden comparar los indicadores de manera conjunta, Figura 5.16, donde se observa que al tener las restricciones combinadas, pesa más la restricción de fluctuación horaria que la de caudal mínimo para disminuir los valores de los indicadores. Al analizar las restricciones de manera conjunta se rectifica que mientras más restrictivo es el caudal mínimo y las fluctuaciones máximas horarias de caudales turbinados, menor es la alteración hidrológica asociada.

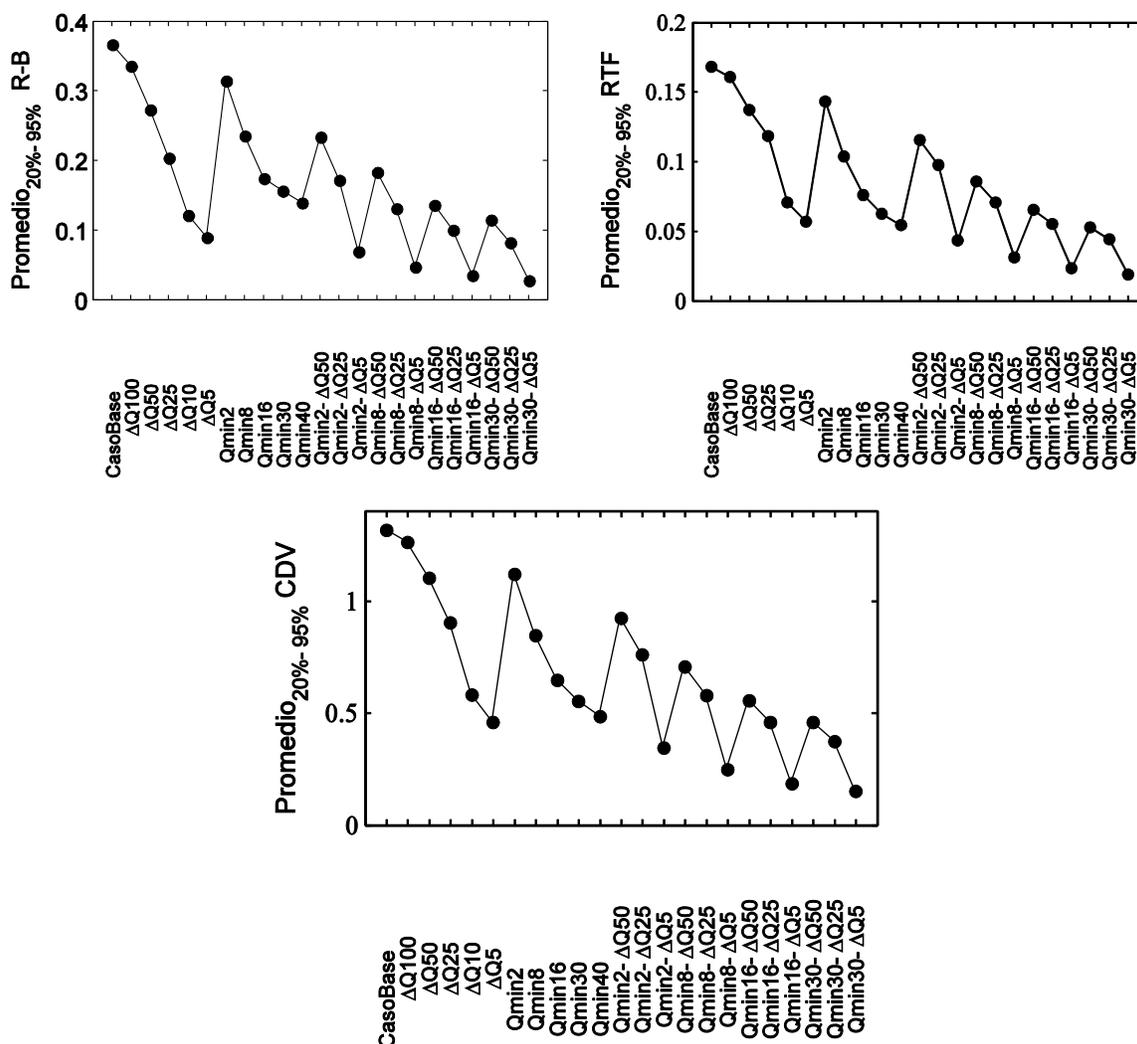


Figura 5.16.- Valores representativos para los IAHL. Periodo 2011.

El mismo resultado obtenido en la Figura 5.16 se puede ver mediante un gráfico de curvas de nivel, en donde es posible comparara ambas restricciones con sus correspondientes valores representativos de los indicadores para todo el año 2011. A modo de ejemplo en la Figura 5.17 se muestra el indicador R-B, donde se puede ver que las restricciones de fluctuaciones máximas horarias son las que generan valores menores indicadores por si solas independiente del caudal mínimo impuesto. Producto de que imponer restricciones

tanto de fluctuación horaria como de caudal mínimo muy estrictas pueden alterar de manera significativa la operación de la central con respecto al Caso Base es preferible tener combinaciones ambas restricciones más relajadas para afectar lo menor posible la operación de *hydropeaking* característica del embalse Rapel. En la Figura 5.17 se puede ver que para un mismo valor del indicador existen combinaciones de restricciones que generan el mismo grado de alteración sin alterar de manera significativa la operación de la central.

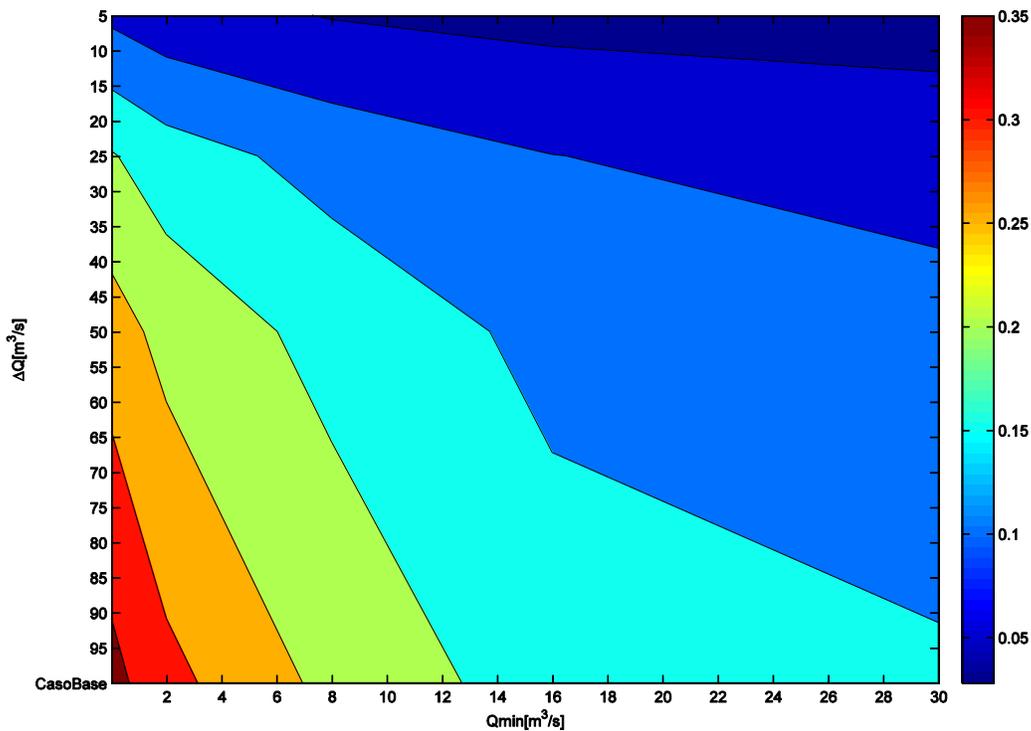


Figura 5.17.- Análisis de restricciones en la operación mediante curvas de nivel.

## 5.2. Volumen asociado al caudal turbinado

Para determinar el volumen de agua turbinado durante todo el periodo de estudio, se sumaron todos los caudales horarios entregados por el MIPUC para cada restricción considerada.

De la Figura 5.18 se observa que los volúmenes utilizados tienen una diferencia de  $\pm 14\%$  con respecto al volumen turbinado por el Caso Base, por lo que al estar trabajando con volúmenes similares no se esperan cambios en las funciones de costos futuros de los embalses, las que se consideraron constantes e iguales a los del Caso Base para las distintas restricciones.

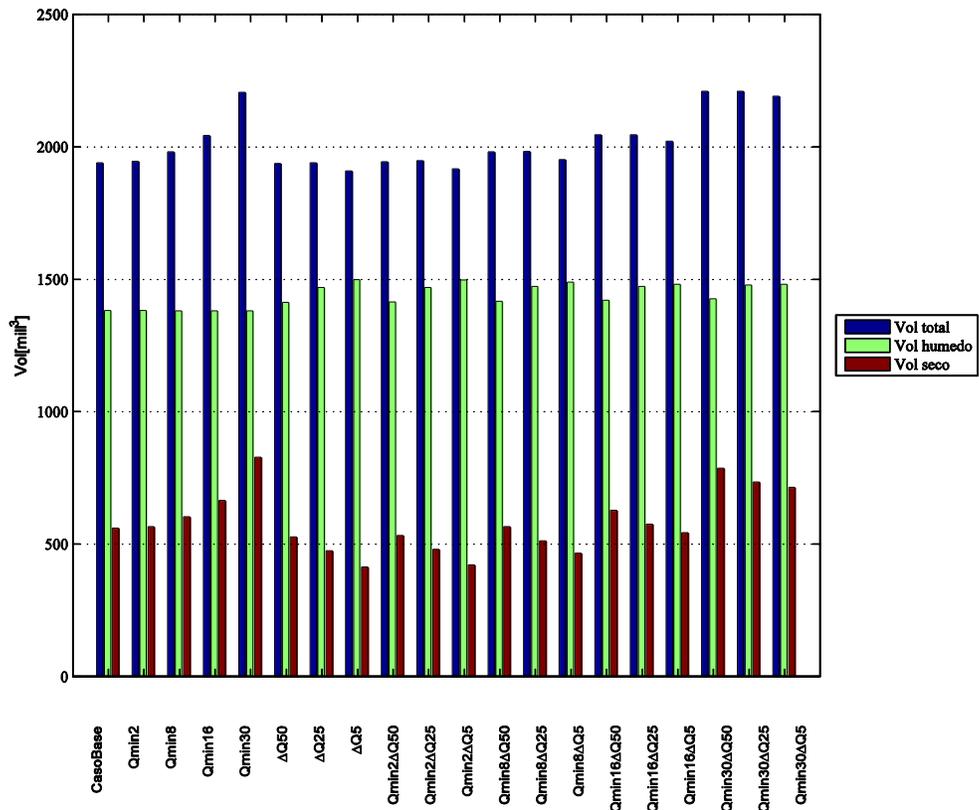


Figura 5.18.- Volúmenes turbinados según la restricción. Periodo 2011.

## 6. ALTERACIÓN RÉGIMEN TÉRMICO INTRADIARIO

### 6.1. Indicadores de Alteración Térmica Intradiarios (IATI)

Para poder capturar las fluctuaciones de la operación horaria en la temperatura, se requieren indicadores que capturen variaciones horarias, para esto se utilizarán los indicadores propuestos por Zimmerman et al., (2001) pero con modificaciones de manera de poder aplicarlos a temperaturas horarias. Estos indicadores al igual que los propuestos por Zimmerman para la alteración hidrológica serán adimensionales y se trabajará tanto con las temperaturas y caudales horarios, ya que no tiene sentido sumar las temperaturas de un día dado que no representan un flujo como los caudales, por lo que considerarán cuando sea necesario flujos térmicos. Los indicadores con los que se trabajará son los siguientes:

- Richards-Baker Temperatura (R-BT)

Corresponde a la suma absoluta de las fluctuaciones de temperatura diarias dividido por la suma del flujo térmico total de un día sobre el caudal total vertido. Se trabaja con los 24 datos diarios de temperatura ( $n=24$ ).

$$R - BT = \frac{\sum_{i=1}^{24} 0.5(|t_{i+1} - t_i| + |t_i - t_{i+1}|)}{\frac{\sum_{i=1}^{24} t_i Q_i}{\sum_{i=1}^{24} Q_i}} \quad \text{Ec. 7}$$

Al igual que para los IAHI, este indicador representa la fluctuaciones sobre el flujo térmico de un día. Los valores cero se obtienen si no existe una variación de temperatura durante un día y mientras mayor sea este indicador, mayor es la diferencia que se tiene entre los caudales vertidos y sus temperaturas horarias de salida.

- Coeficiente de Variación de Temperatura (CVT)

Este indicador corresponde al valor de la desviación estándar en un día dividido sobre la temperatura diaria promedio.

$$CVT = \frac{\sigma}{\frac{\sum_{i=1}^{24} t_i}{24}} \quad \text{Ec. 8}$$

En un cauce natural la temperatura del agua, depende de varios factores, en donde la más importante corresponde a las condiciones atmosféricas, por lo que se espera que el régimen térmico de un cauce natural sea similar a las condiciones de temperatura de la zona, razón

por lo que se aplicará el RDT en las series temporales de caudales de salida de la central como un indicador para determinar la alteración de régimen térmico.

- Rango Diurno de Temperatura (RDT)

Este indicador caracteriza la diferencia entre la temperatura máxima y mínima de un día.

$$RDT = t_{max} - t_{min} \quad \text{Ec. 9}$$

Dado que para utilizar estos indicadores se necesitan los caudales vertidos y su temperatura a escala horaria, se debe asegurar una operación continua durante el periodo de análisis ya que si la central no se encuentra operando no es posible asociarle una temperatura de salida a un caudal vertido inexistente.

## 6.2. Temperatura del Agua de Salida del Embalse

Para determinar la temperatura del agua de salida del embalse se utiliza el modelo tridimensional CWR-ELCOM. Los datos de entrada utilizados por el modelo serán los mismos que los utilizados y recopilados por Ibarra (2012), parte de los cuales son obtenidos de una cadena compuesta por 10 termistores instalados en la cercanía del muro, ubicados cada 5 metros de profundidad hasta llegar a los 50 metros, los que permiten registrar el perfil de temperaturas cada media hora. Los datos meteorológicos provienen de una estación ubicada cerca del estero Alhué que posee registros horarios.

En base a los datos recopilados por Ibarra (2012) es posible modelar el comportamiento del embalse Rapel para dos periodos:

- Periodo 1: 26 noviembre 2009 al 05 de abril del 2010.
- Periodo 2: 28 de marzo 2011 al 30 junio 2011.

Dado que lo que se quiere ver es como la operación horaria puede afectar a la temperatura del agua de salida, no tiene sentido aplicar las restricciones de la operación en el Periodo 2, producto de que en esos meses se observan condiciones de mezcla en el embalse, lo que implica que la temperatura sea prácticamente constante en el perfil vertical, por lo que el efecto de la operación sobre la temperatura de salida induce a cambios prácticamente despreciables de temperatura para este periodo de tiempo. Para evitar las condiciones homogéneas de temperatura en el embalse, el periodo relevante a analizar corresponde a las fechas estivales, en donde se produce estratificación y la extracción podría inducir mezcla y cambios en la temperatura de salida.

Producto de que la estratificación del embalse se produce todos los años durante el mismo periodo y de que no se tienen los datos de entrada necesarios para el modelo CWR-ELCOM para todo el año 2011, se utilizarán los datos del Periodo 1, para aplicar las

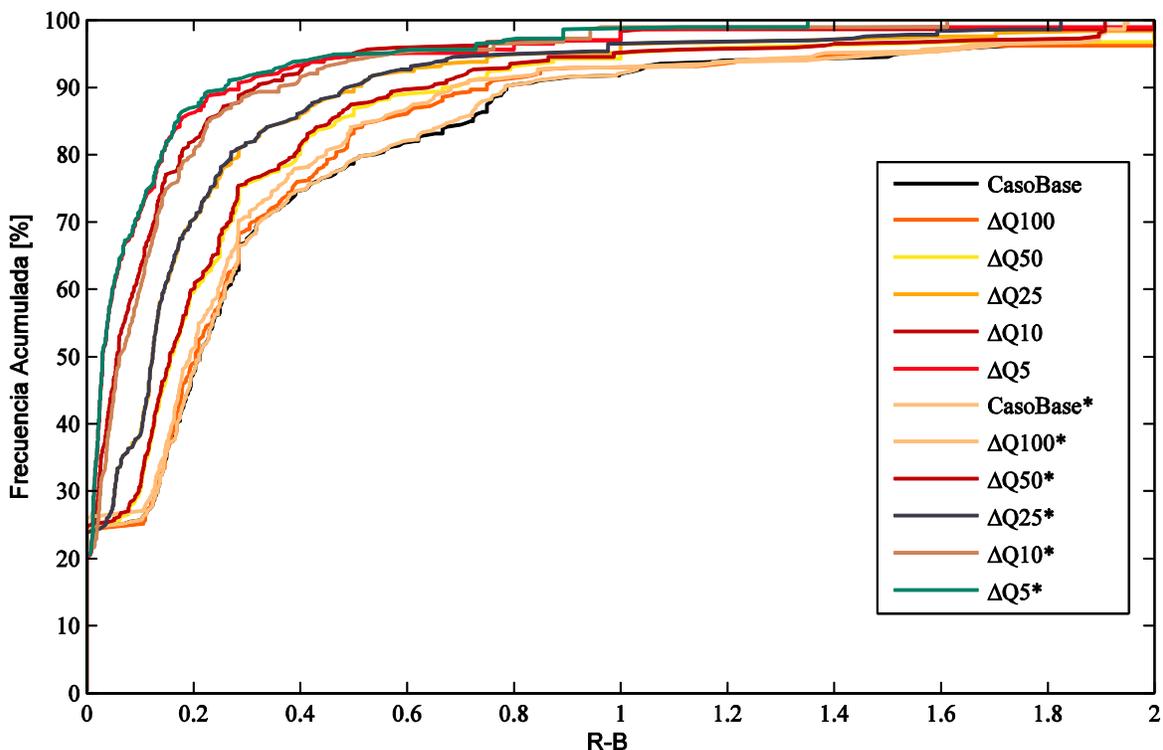
restricciones de operación del 2011, considerando que las demandas energéticas son similares para los mismos meses entre años consecutivos, se asumirá que al aplicar restricciones en la operación el comportamiento del sistema debe responder de manera similar entre estos años. El periodo que se utilizará para aplicar el modelo CWR-ELCOM va desde el 1 de enero del 2010 hasta el 26 de febrero del 2010, esto producto de que el día 27 de febrero se produce un terremoto en Chile, por lo que se tienen variaciones en las condiciones de estratificación y en la hidrodinámica del embalse que alterarían la temperatura de salida del agua del embalse.

Para poder aplicar el modelo CWR-ELCOM dado que se trabajará en base a las condiciones del 2010 para ser consistentes con los datos a partir de los cuales se ejecuta el modelo MIPUC, se cambiarán los datos de caudales afluentes al embalse del CWR-ELCOM y se usarán los mismos que usa el modelo MIPUC para ese periodo de tiempo, producto de que como se vio en el Capítulo 3.2 el 2011 es un año más seco que el 2010. Otros valores que deben ser modificados son los caudales efluentes del embalse que irán variando dependiendo de la restricción impuesto a la operación, el resto de los datos de entrada del modelo se considerarán constantes.

### **6.2.1. Escenario Base**

Producto de que no se tiene un régimen natural de la situación sin embalse, al igual que para la comparación de IAHI se utilizará como Caso Base la temperatura de salida asociada a la operación sin restricción de la central. Para comparar los IATI asociados a cada restricción se requiere que la central opere durante todo el periodo de análisis, razón por la que el Caso Base y los casos con restricciones de fluctuaciones máximas horarias ( $\Delta Q_{\text{máx}}$ ), utilizados para calcular los IAHI, no sirven ya que presentan periodos con operación nula, razón por la cual se considerarán restricciones equivalentes a estas en las que se impone un caudal mínimo bajo y las mismas condiciones de fluctuaciones de manera de capturar el efecto de limitar la variación horaria de la generación de la central y ver si afecta a la temperatura de salida.

Para determinar los casos equivalentes se considerarán restricciones que generen los mismos valores de los IAHI, con la única diferencia que se les agregará un caudal mínimo bajo para asegura el flujo constante de agua turbinada con su correspondiente temperatura.



**Figura 6.1.- Indicar R-BT, Periodo 2011. Casos equivalentes al Caso Base y a los casos con restricciones de variaciones máximas horarias aplicados para determinar los IAHI. Casos con \* tienen un caudal mínimo de operación asociado de 0.1 m<sup>3</sup>/s.**

En la Figura 6.1 se puede ver que al aplicar restricciones con un caudal mínimo de operación de 0.1 m<sup>3</sup>/s (casos con \*) se tiene un comportamiento prácticamente idéntico en término de los IAHI entre los casos equivalentes, por ejemplo ΔQ100 con ΔQ100\*. Producto de lo anterior para determinar los IATI se utilizarán como casos equivalentes los siguientes:

IAHI	IATI
Caso Base	Caso Base* = Q <sub>mín</sub> 0.1
ΔQ5	ΔQ5* = Q <sub>mín</sub> 0.1-ΔQ5
ΔQ25	ΔQ25* = Q <sub>mín</sub> 0.1-ΔQ25
ΔQ50	ΔQ50* = Q <sub>mín</sub> 0.1-ΔQ50

**Tabla 6.1.- Equivalencias entre casos para calcular IAHI con los casos para determinar los IATI.**

### 6.3. Resultados Indicadores de Alteración Régimen Térmico Intradiario

Al modificar en el modelo CWR-ELCOM los caudales de salida de la central en función de la restricción de operación impuesta se obtienen a escala horaria la temperatura de salida del caudal turbinado, con lo que es posible calcular los IATI y contrastar las distintas restricciones impuestas con respecto al Caso Base\*. A continuación se muestran las

diferentes restricciones aplicadas y algunos de los IATI obtenidos, el resto se adjunta en el ANEXO C.

### 6.3.1. Restricción Caudal Mínimo de Operación ( $Q_{\min}$ )

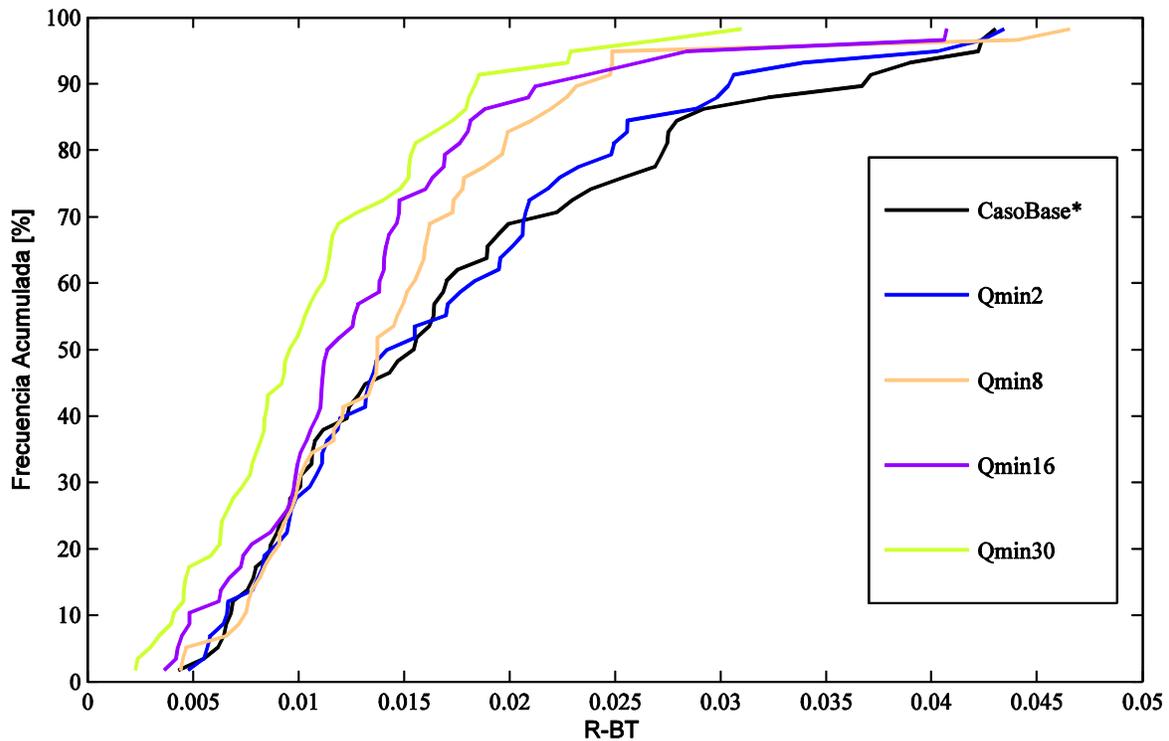


Figura 6.2.- Indicador R-BT. Restricciones caudal mínimo.

De la Figura 6.2, se observa que los indicadores de temperatura se comportan de manera similar que los IAHI, en donde a mayor restricción de caudal mínimo impuesta menores valores se obtienen de los indicadores. En los escenarios menos restrictivos ( $Q_{\min 2}$  y  $Q_{\min 8}$ ) se observa que un 40% del tiempo los indicadores tienen un comportamiento similar al Caso Base\*, mientras que los escenarios más restrictivos se tiene un desplazamiento en las curvas de duración con respecto a la obtenido a partir del Caso Base\*. Analizando las series temporales de temperaturas, Figura 6.3, se ve que estas restricciones generan temperaturas de salidas prácticamente iguales que al Caso Base\* durante los primeros 20 días aproximadamente, posterior a eso la temperatura promedio de salida comienza a aumentar, pero se siguen observando fluctuaciones horarias con un patrón similar para todas las restricciones de caudales mínimos impuestas. El aumento de la temperatura de salida que se observa en los casos más restrictivos se puede adjudicar a condiciones de mezcla que se generan en el embalse por la operación de la central, esto producto de que mientras mayor es el volumen de agua que se debe extraer más rápido se mezclan las aguas que se encuentran más cerca de la superficie a mayores temperaturas con las que se encuentran cerca de la zona de extracción (a una menor temperatura inicialmente).

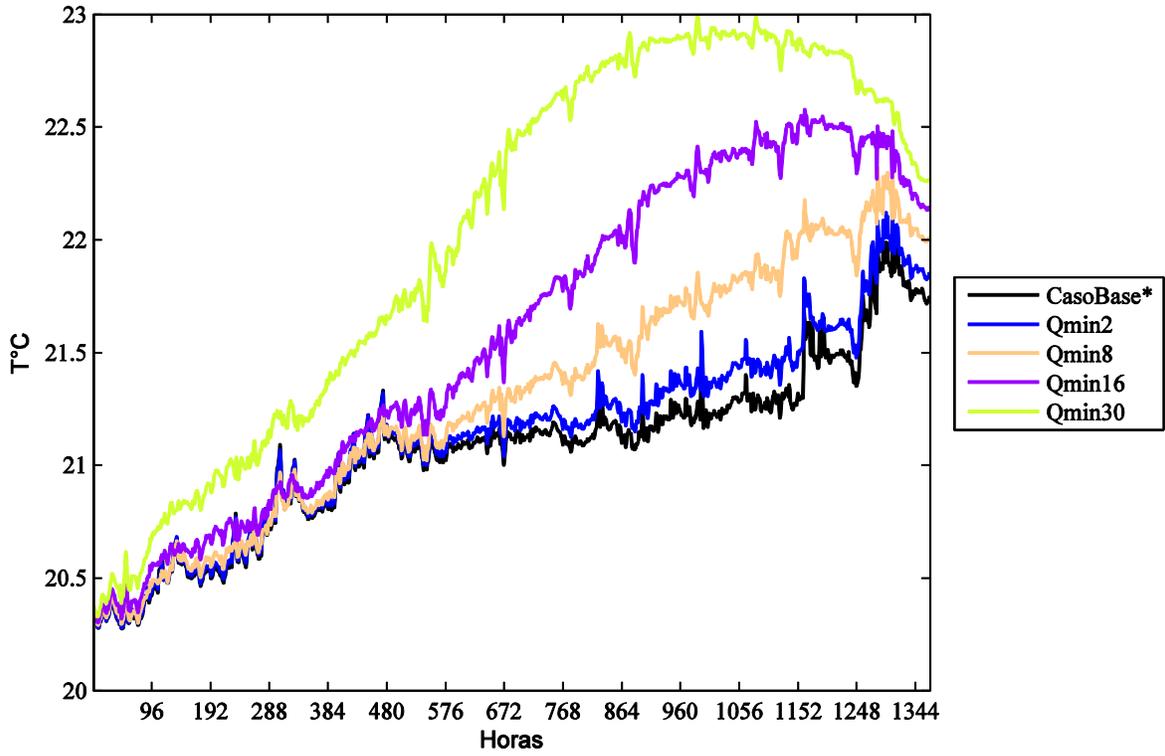


Figura 6.3.- Temperatura horaria de salida del embalse. Restricciones caudal mínimo.

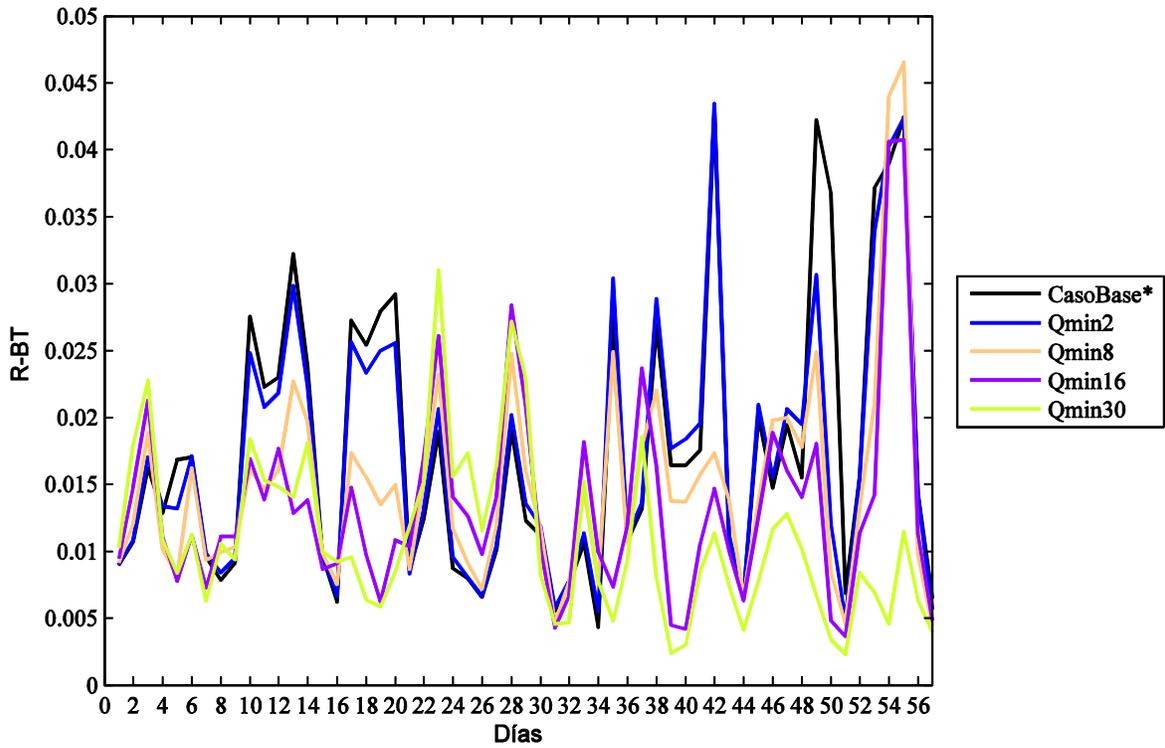


Figura 6.4.-Serie temporal indicador R-BT. Restricción caudal mínimo.

### 6.3.2. Restricción Fluctuación Máxima Horaria de Operación ( $\Delta Q_{\text{máx}}$ )

Al aplicar las restricciones de fluctuaciones máximas horarias de caudal se mantiene el comportamiento visto en los IAHI en donde a menor fluctuación impuesta, menores valores de los IATI, en este caso para valores altos se cruzan las restricciones (ver Figura 6.5), mientras que en los valores bajos, se puede ver que un 30% del tiempo los indicadores asociados a las restricciones de fluctuaciones máximas horarias son similares a los obtenidos a partir del Caso Base\*, los que posterior a ese porcentaje comienzan a mejorar a medida es más restrictiva la fluctuación permitida. Los valores máximos de los IATI se alcanzan para todas las restricciones al final del periodo en donde se tienen variaciones de temperaturas diarias de hasta  $0.5^{\circ}\text{C}$ , Figura 6.5 (el valor máximo lo genera la restricción  $\Delta Q_{\text{máx}} 5\text{m}^3/\text{s}$ ).

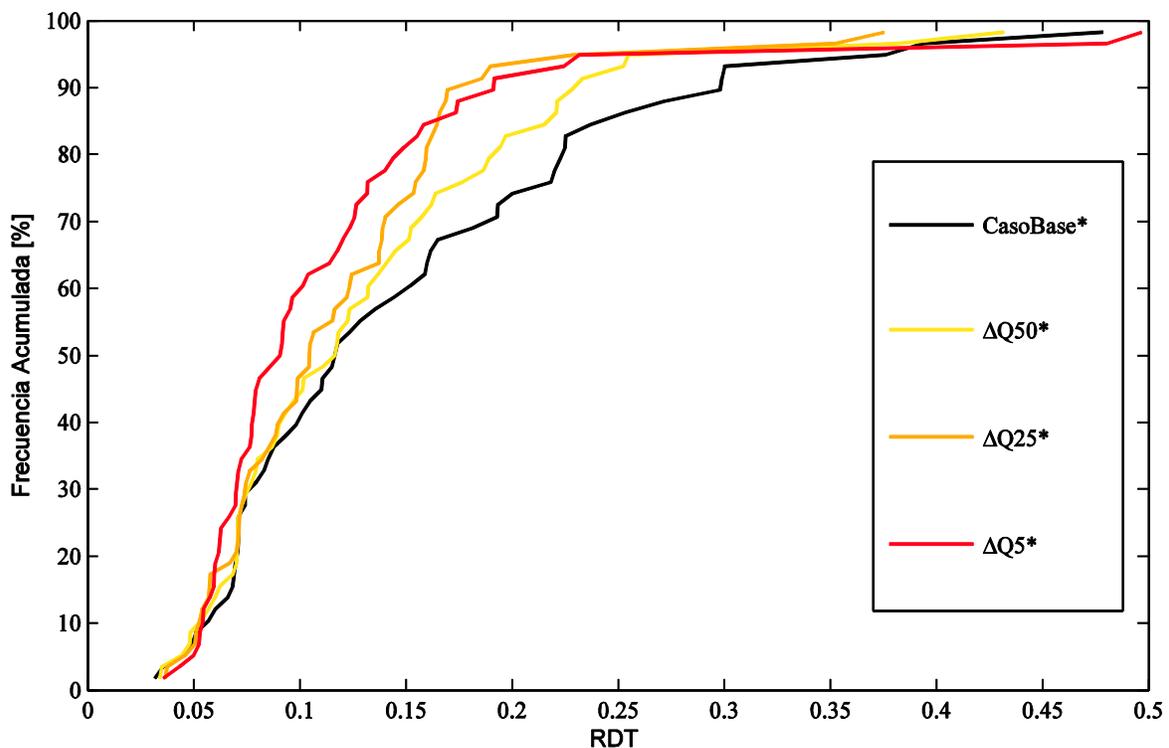


Figura 6.5.- Indicador RDT. Restricciones fluctuaciones máximas horarias.

Analizando la serie temporal de los indicadores para las distintas restricciones no es posible determinar si una restricción genera para todo el periodo valores menores o mayores de los IATI. En la Figura 6.6 se pueden ver los días en que se tienen los valores bajos de los indicadores y similares para las distintas restricciones. A partir de la Figura 6.7, se tiene la operación de la central para las restricciones impuestas, en donde se tienen periodos en donde la central opera de manera constante, los que coinciden con los valores bajos de los indicadores y con los periodos en donde las temperaturas de salida del embalse se mantienen prácticamente constantes, Figura 6.8. En base a esto se puede decir que en términos generales operaciones constantes inducirían a menores IATI.

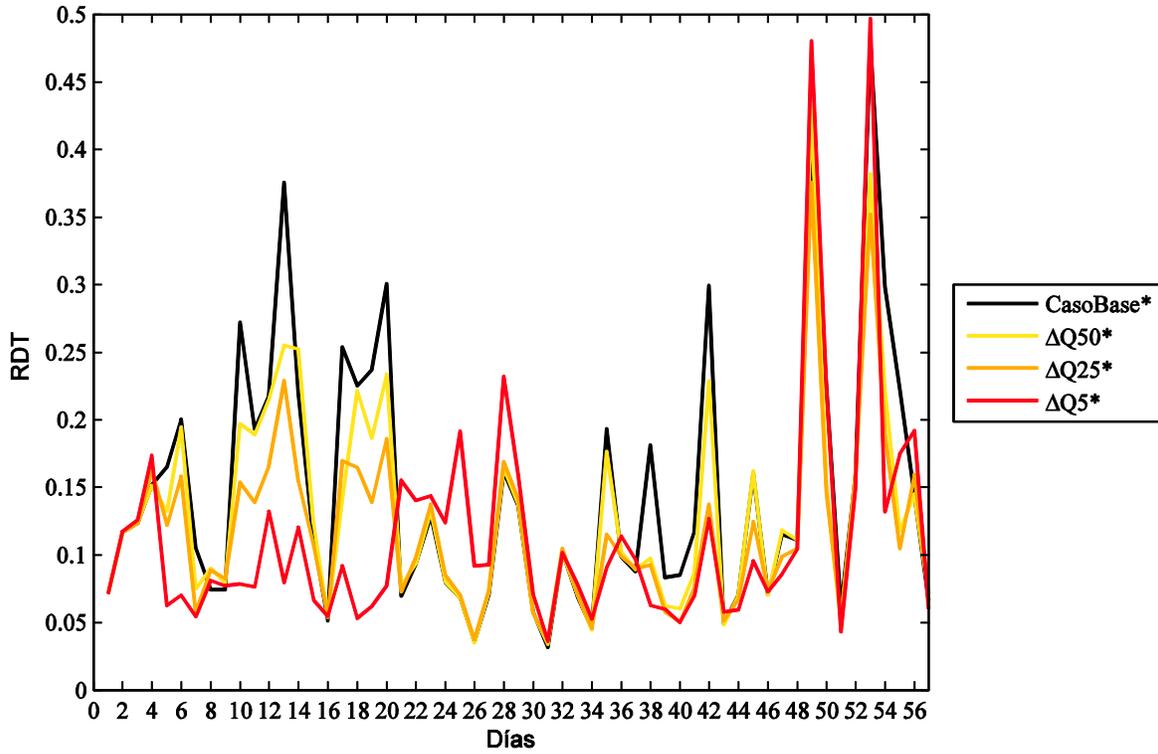


Figura 6.6.- Serie temporal indicador RDT. Restricciones fluctuaciones máximas horarias.

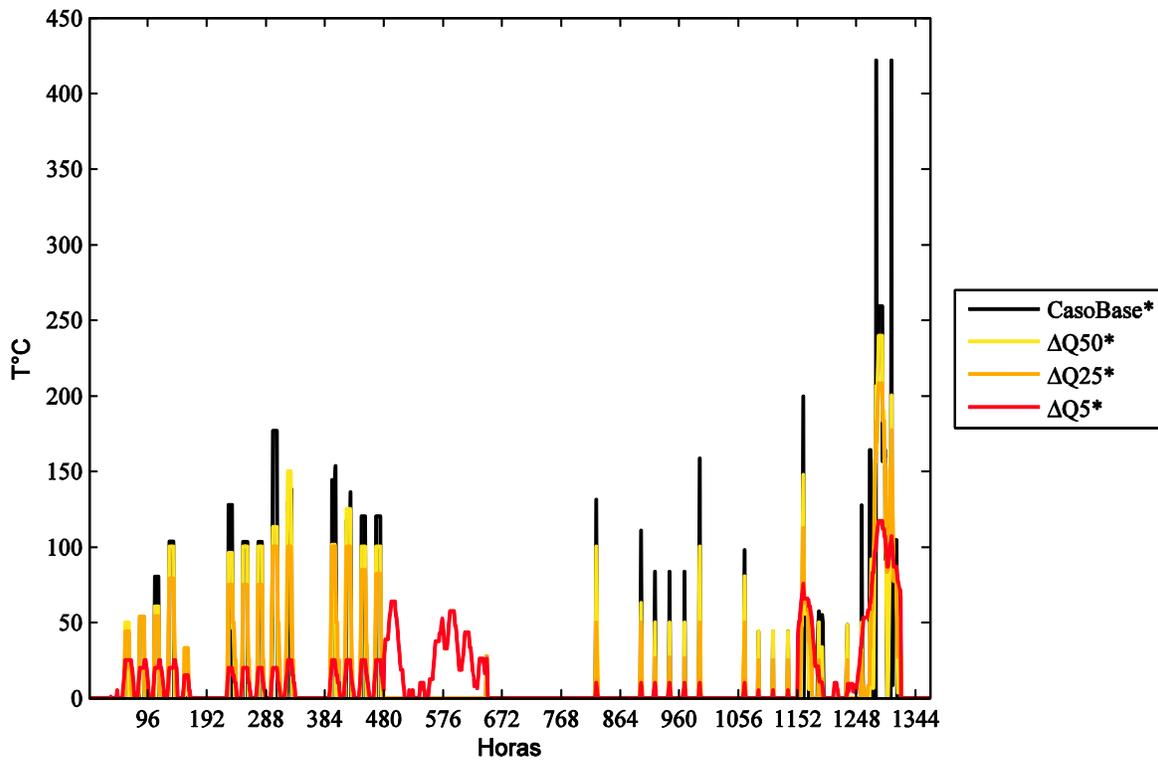


Figura 6.7.- Serie temporal de la operación del embalse. Restricciones ΔQmáx.

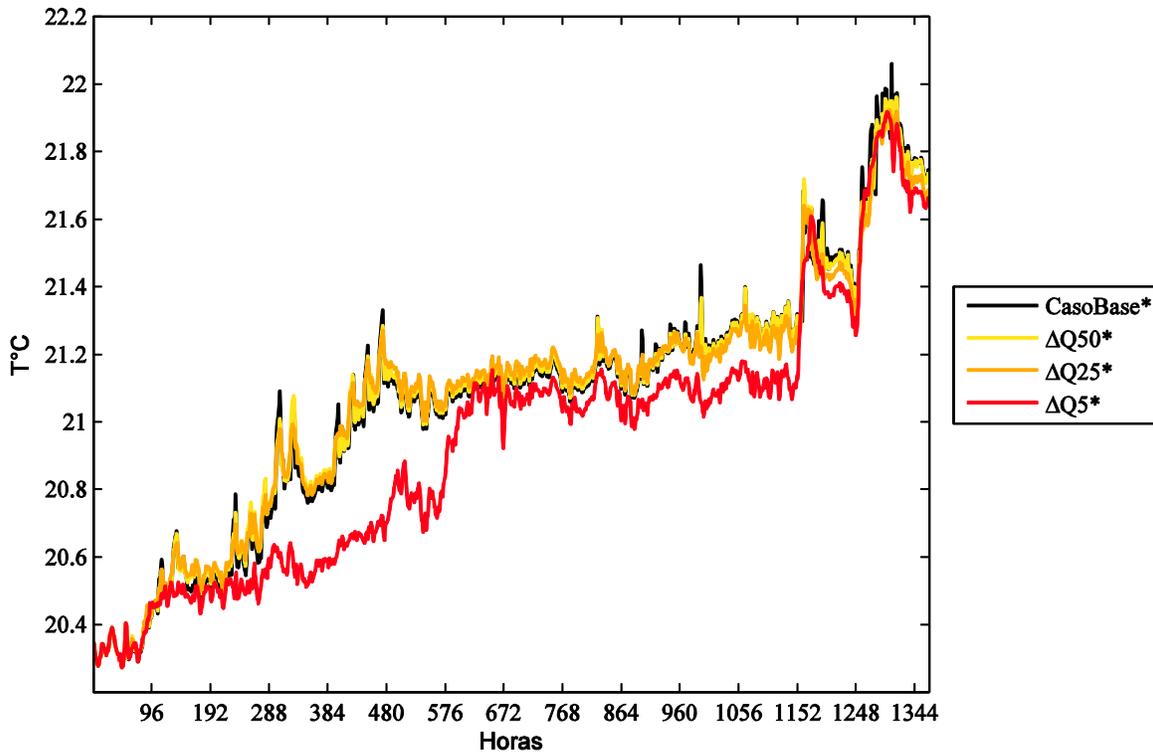


Figura 6.8.- Serie temporal de temperatura. Restricciones fluctuaciones de caudales máximos horarios.

Producto de que estas restricciones tienen asociados volúmenes menores de agua vertida, no se observan las mismas condiciones de mezclas generadas con las restricciones de caudales mínimos por lo que las temperaturas de salida son menores a las asociadas a restricciones de caudales mínimos, pero similares a las del Caso Base\* excepto por el caso más estricto de las fluctuaciones ( $\Delta Q_{\text{máx}} 5 \text{ m}^3/\text{s}$ ) el que presenta temperaturas menores que las del Caso Base\*, ver Figura 6.8, esto se puede adjudicar a que esta última restricción al limitar las grandes fluctuaciones que se pueden dar en el embalse Rapel, limita a su vez los volúmenes de agua extraídos, razón por la que no se tienen intercambios considerables con las aguas de capas más superficiales.

### 6.3.3. Restricción Caudal Mínimo y Fluctuación Máxima Horaria de Operación

Al combinar las restricciones de cauda mínimo y de fluctuaciones máximas horarias permitidas, se puede analizar al igual que para los IAHI los efectos de tener una operación mínima y el efecto de incorporarle restricciones que limiten la fluctuación o el caso contrario.

- $Q_{\min}$  constante  $\Delta Q_{\max}$  variable

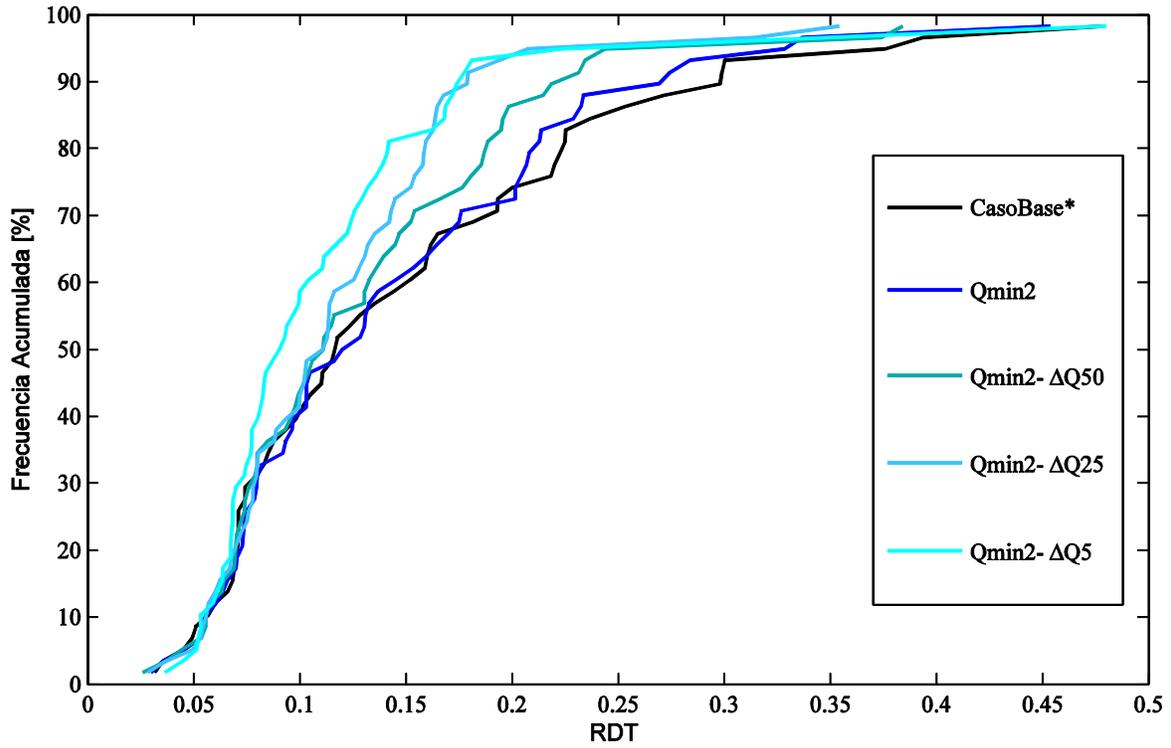


Figura 6.9.- Indicador RDT. Restricción  $2 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $\Delta Q_{\max}$  variables.

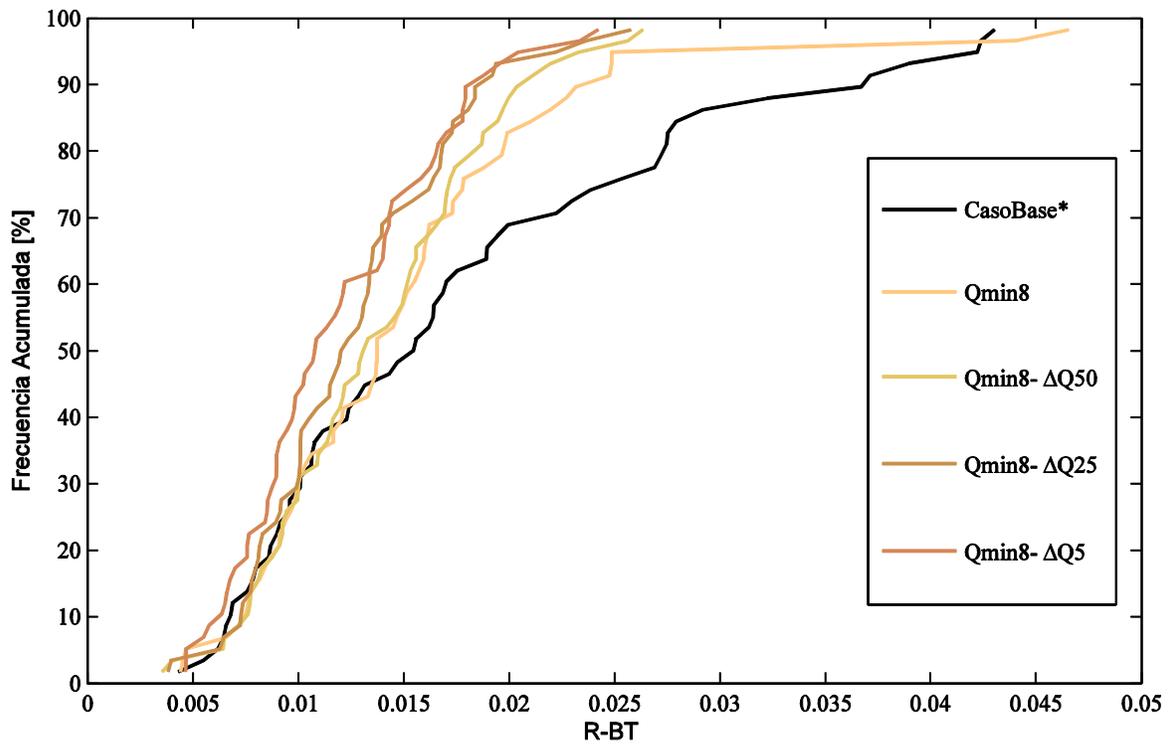


Figura 6.10.- Indicador R-BT. Restricción  $8 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $\Delta Q_{\max}$  variables.

Al aplicar restricciones a la operación con caudal mínimo constante y las diferentes fluctuaciones horarias permitidas, se tiene que para los casos de caudales mínimos menos restrictivos ( $Q_{\text{mín}} 2$ , Figura 6.9 y  $Q_{\text{mín}} 8 \text{ m}^3/\text{s}$ , Figura 6.10) el efecto es el mismo que en los IAHI a menor fluctuación horaria permitida menores valores para los indicadores con respecto al Caso Base\*, mientras que para las restricciones con caudales mínimos más altos ( $Q_{\text{mín}} 16$ , Figura 6.11 y  $Q_{\text{mín}} 30 \text{ m}^3/\text{s}$ , Figura 6.12) no tiene sentido limitar las fluctuaciones horarias ya que no generan una variación en término de los indicadores, este comportamiento se observa para todos los indicadores propuestos (ANEXO D).

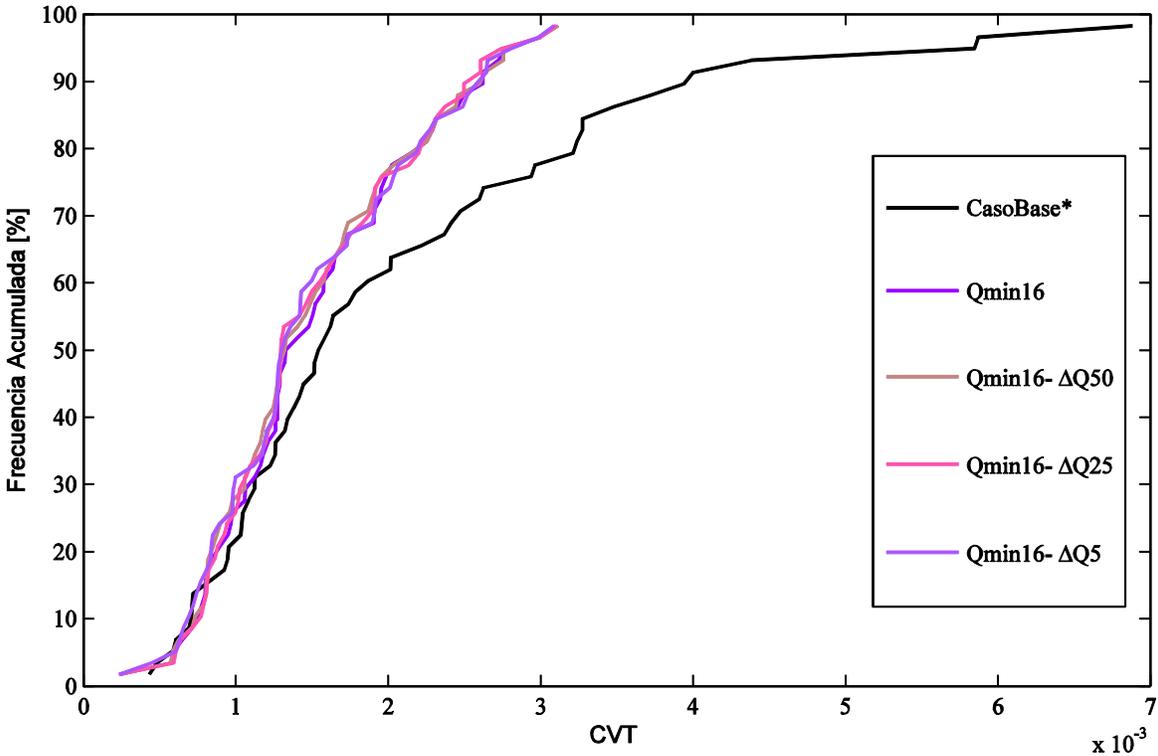


Figura 6.11.- Indicador CVT. Restricción  $Q_{\text{mín}} 16 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $\Delta Q_{\text{máx}}$  variables.

La similitud que se tiene entre los IATI que tienen el mismo caudal mínimo y variaciones intrahorarias distintas también se aprecia al observar la serie temporal de los indicadores (Figura 6.13), en donde producto de imponer un caudal mayor se obliga a tener un mayor volumen turbinado el que varía poco independiente de la condición de fluctuación horaria que se tenga, razón por la que el volumen de agua turbinado es similar y por ende las condiciones de mezcla que inducen cambios en la temperatura del agua de salida del embalse.

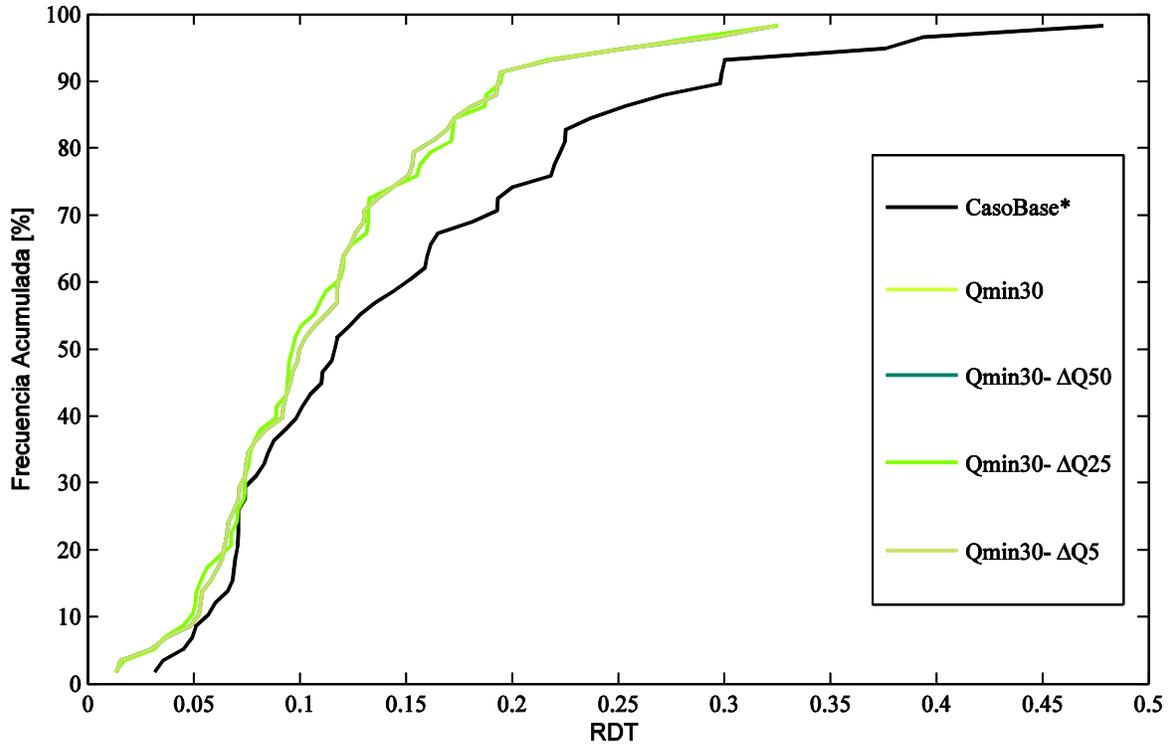


Figura 6.12.- Indicador RDT. Restricción  $Q_{\min} 30 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $\Delta Q_{\max}$  variables.

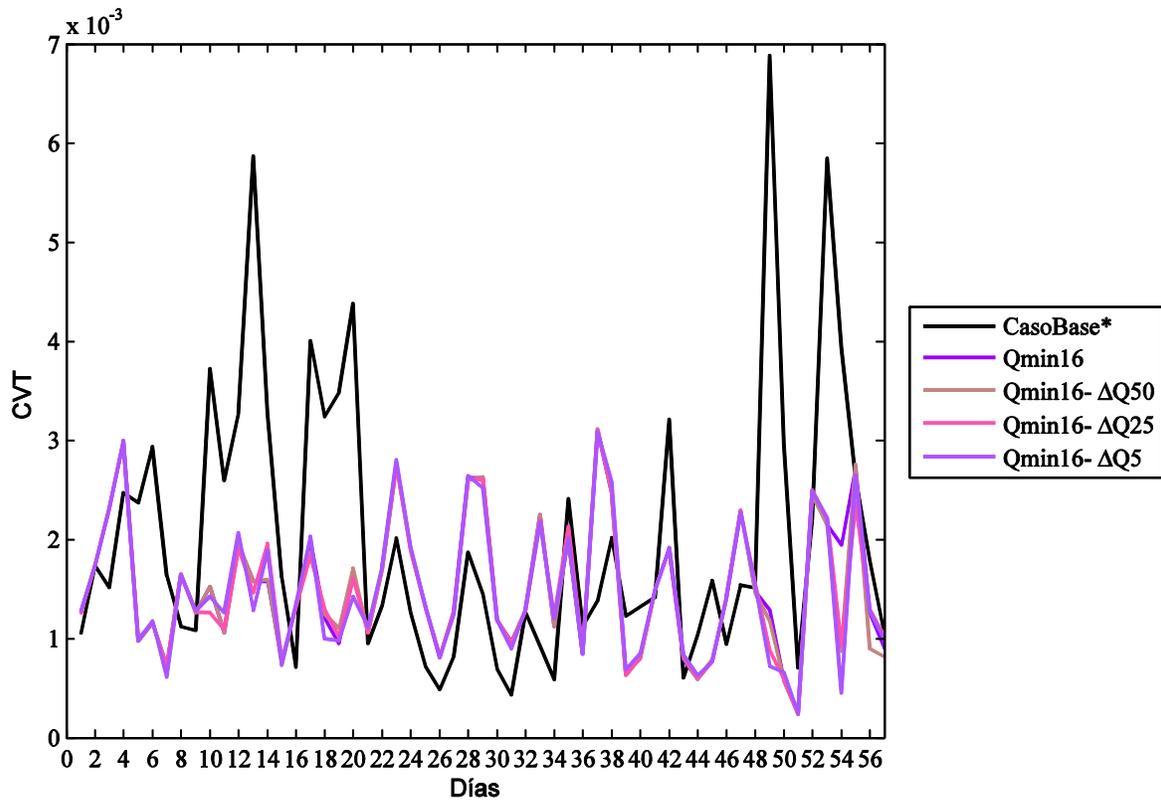


Figura 6.13.- Serie temporal indicador CVT. Restricciones  $Q_{\min} 16 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $\Delta Q_{\max}$  variables.

Si se analiza el efecto de combinar estas restricciones en las series temporales de temperatura, se tiene las temperaturas son mayores que las temperaturas del Caso Base\* excepto por las restricciones de caudales mínimos de 2 y 8 m<sup>3</sup>/s que tienen asociadas la fluctuación horaria más estricta ( $\Delta Q_{\text{máx}} 5 \text{ m}^3/\text{s}$ ) las que generan una temperatura menor que la del Caso Base\* (Figura 6.14) en algunos periodos, producto de los volúmenes utilizados por estas restricciones a nivel horario.

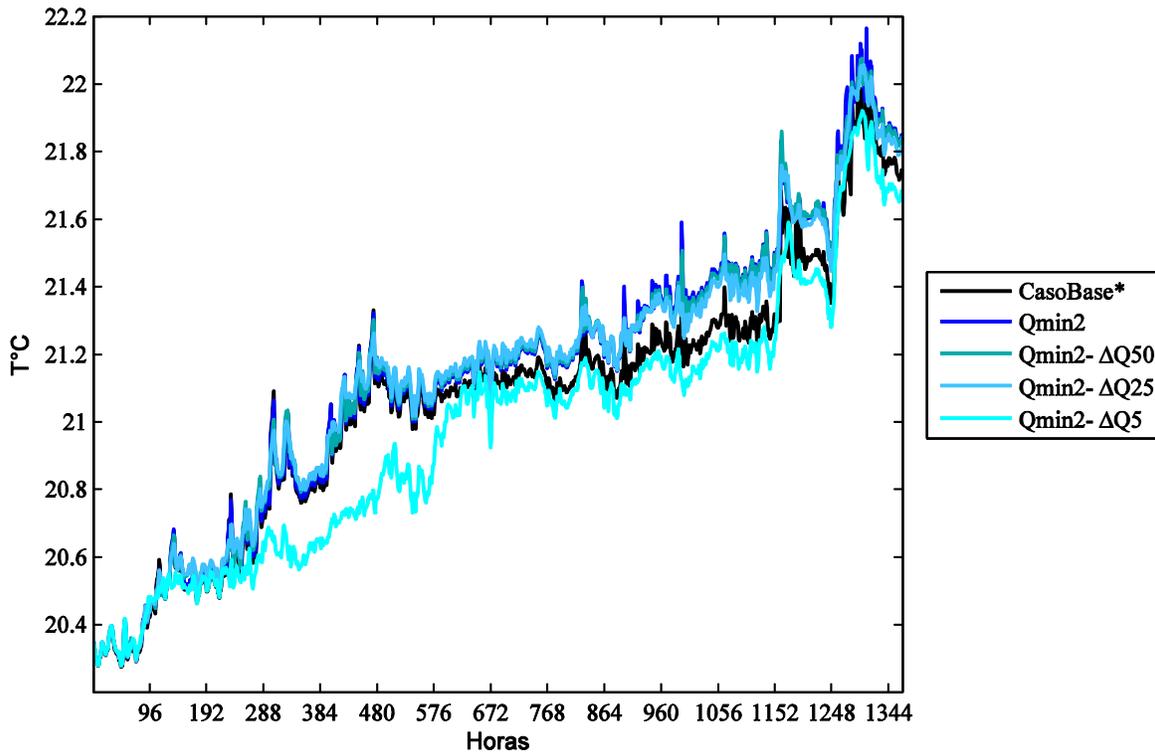


Figura 6.14.- Serie temporal de temperatura. Restricciones  $Q_{\text{min}2} \text{ m}^3/\text{s}$  y  $\Delta Q$  variable.

Para los casos de caudales mínimos más grandes ( $Q_{\text{mín}} 16$  y  $30 \text{ m}^3/\text{s}$ , Figura 6.15) se observan aumentos en la temperatura con respecto al Caso Base\*, las que además siguen un patrón similar durante el todo periodo de estudio. Para estas condiciones agregar además restricciones a nivel horario con respecto a las fluctuaciones no induce a ningún cambio en la temperatura de salida del agua del embalse ya que producto de que el caudal extraído es mayor que para los otros casos las condiciones de mezcla son más favorables y son las que finalmente condicionan la temperatura del agua a la salida del embalse.

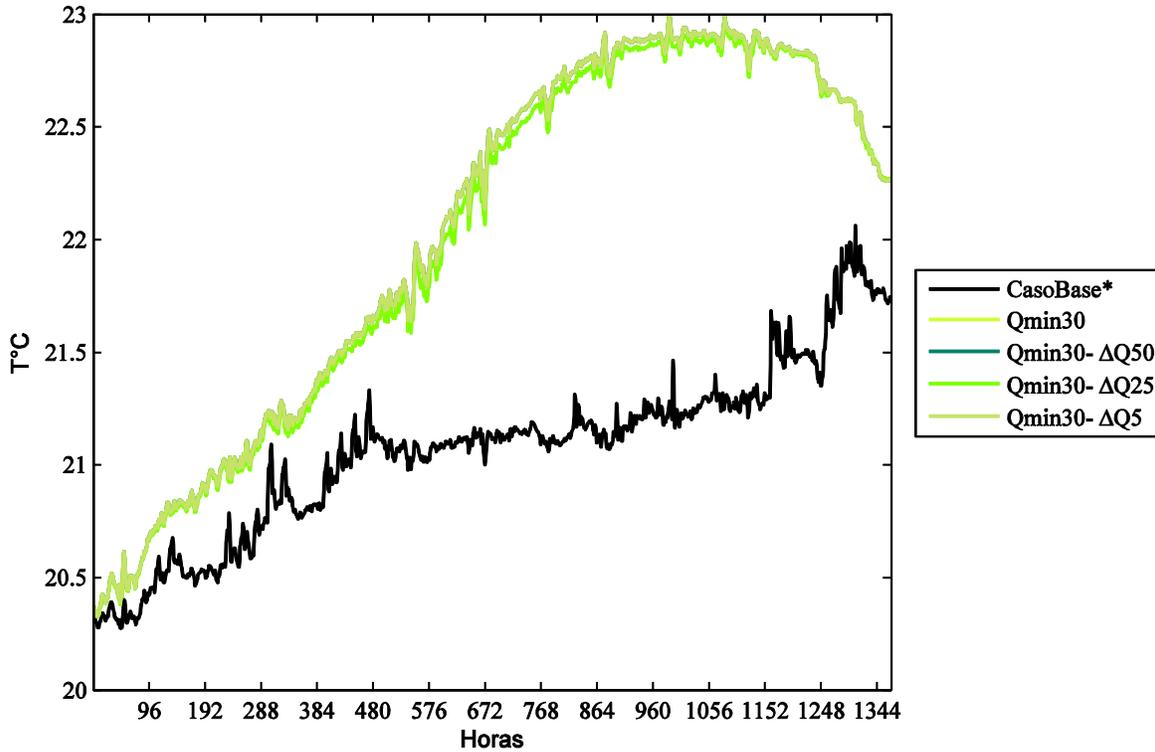


Figura 6.15.- Serie temporal de temperatura. Restricciones  $Q_{min30}$   $m^3/s$  y  $\Delta Q$  variable.

- $Q_{min}$  variable  $\Delta Q_{max}$  constante

Al modificar las restricciones de caudal mínimo impuesto para una cierta fluctuación máxima horaria, resulta un poco más complejo determinar el comportamiento de los indicadores, dado que poseen valores similares y tienden a cruzarse.

Los IATI obtenidos producto de la operación impuesta van a ser más parecidos entre ellos mientras más restrictiva sea la fluctuación horaria impuesta, Figura 6.16, Figura 6.17 y Figura 6.18. A pesar de la similitud que se tiene entre los IATI, en las tres figuras mencionadas anteriormente se tiene que las restricciones que poseen un caudal mínimo de  $30 m^3/s$  producen valores menores para los indicadores en comparación con las otras restricciones de caudales mínimos.

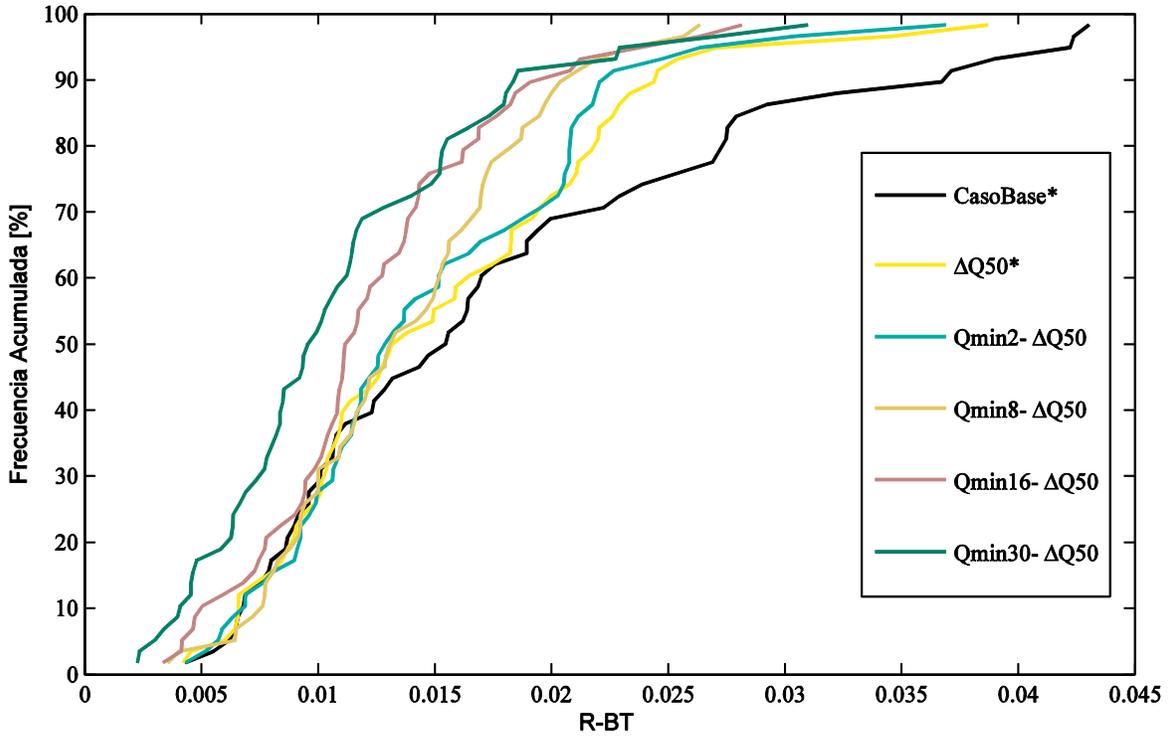


Figura 6.16.- Indicador RB-T. Restricción  $\Delta Q_{\text{máx}}$  50 m<sup>3</sup>/s y  $Q_{\text{mín}}$  variables.

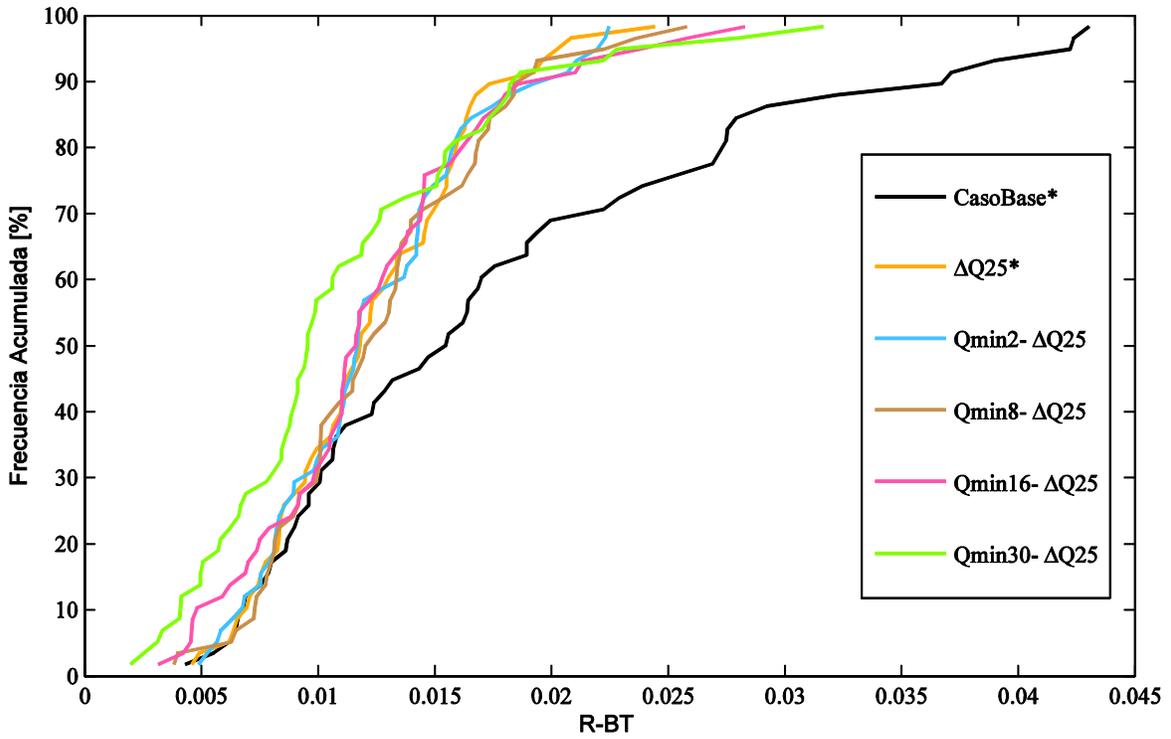


Figura 6.17.- Indicador RB-T. Restricción  $\Delta Q_{\text{máx}}$  25 m<sup>3</sup>/s y  $Q_{\text{mín}}$  variables.

En términos generales se observa que mientras mayor sea la limitación de fluctuación máxima horaria menores son los valores de los IATI. En la Figura 6.16, se tiene un comportamiento similar entre la operación sin restricción de caudal mínimo y con aquella que lo restringe a  $2 \text{ m}^3/\text{s}$ , esto producto de la similitud que se tiene entre los volúmenes turbinados por estas restricciones.

Los indicadores asociados a las restricciones de  $\Delta Q 5 \text{ m}^3/\text{s}$ , Figura 6.18, presentan un comportamiento similar independiente de la restricción de caudal mínimo que se imponga. Una particularidad es que entre un 70% y un 100% de la frecuencia acumulada, las operaciones menos restrictivas ( $\Delta Q_{\text{máx}} 5$  y  $Q_{\text{mín}2} - \Delta Q_{\text{máx}} 5 \text{ m}^3/\text{s}$ ) tienen valores menores en término de los IATI que las operaciones más estrictas, lo que puede ser producto de que las restricciones de caudales bajos en conjunto con la restricción más limitante de fluctuaciones máximas inducen a una baja operación en la central por ende un menor volumen extraído por lo que se tienen menos condiciones para la mezcla en el embalse y por ende menos cambios en la temperatura. Al analizar una serie de temperaturas, se tiene que producto del menor volumen de agua utilizado para los casos con restricciones de caudales mínimos menores ( $Q_{\text{mín}} 2$  y  $Q_{\text{mín}} 8 \text{ m}^3/\text{s}$ ), no se aprecia un incremento en la temperatura para estos dos casos con respecto al Caso Base\*, Figura 6.19.

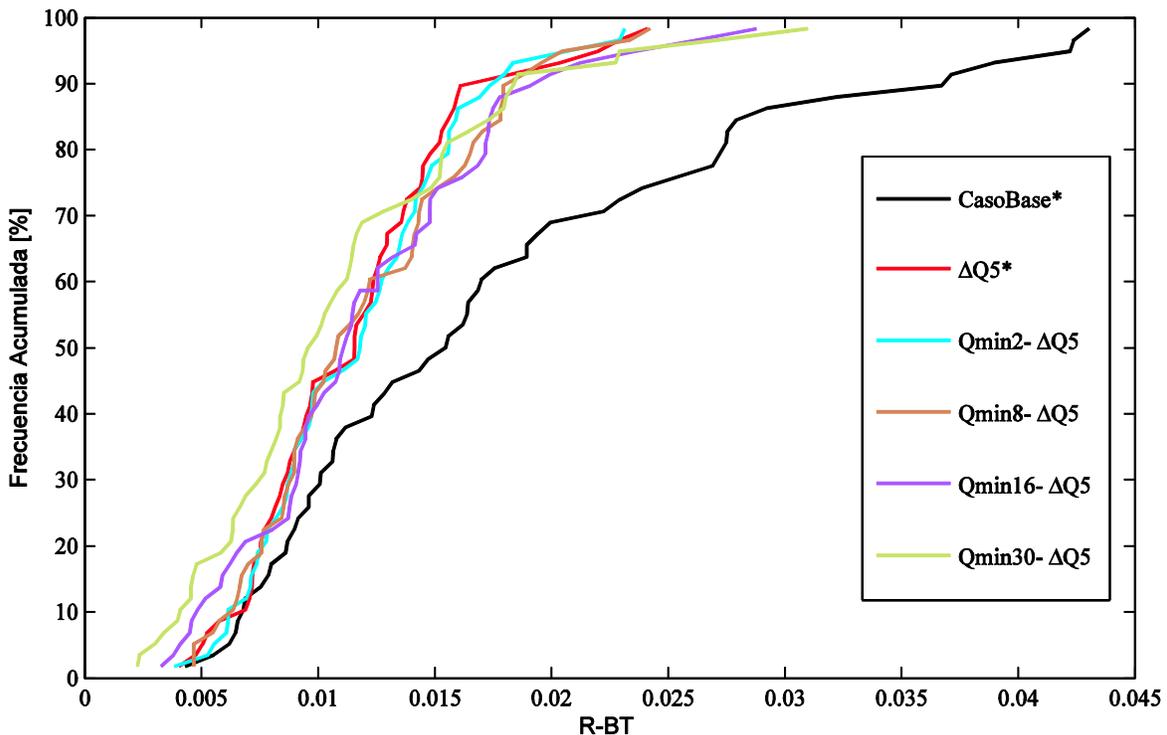


Figura 6.18.- Indicador RB-T. Restricción  $\Delta Q_{\text{máx}} 5 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $Q_{\text{mín}}$  variables.

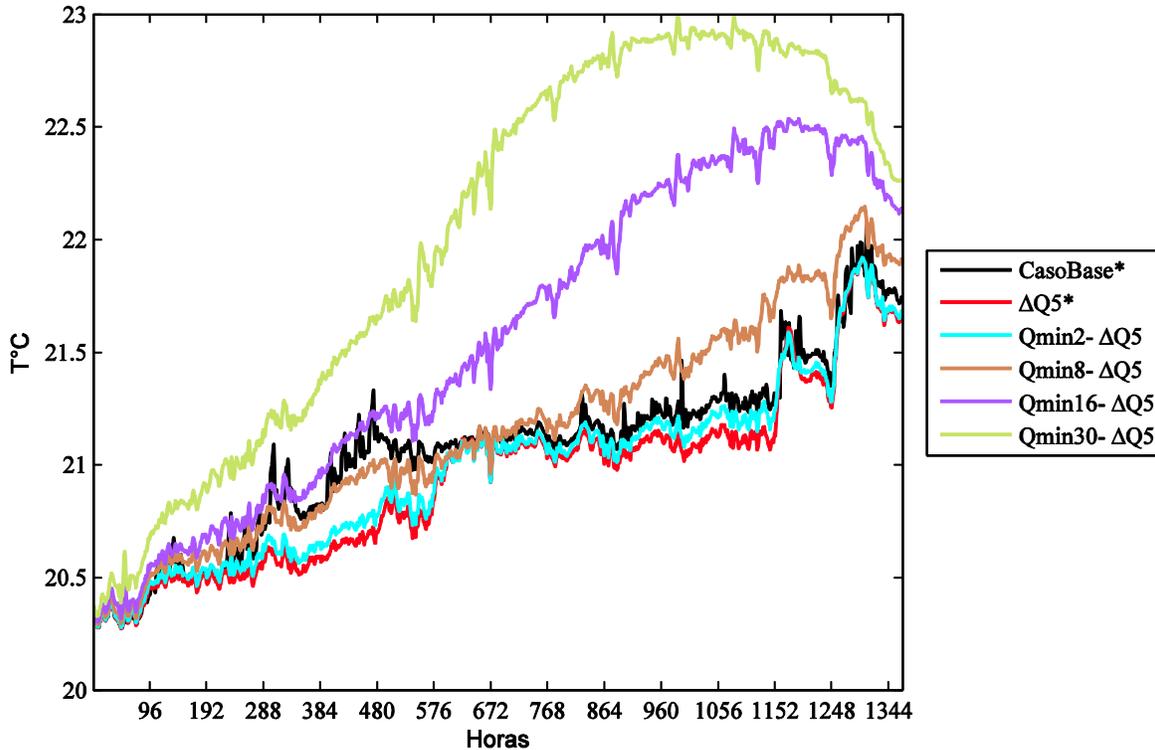


Figura 6.19.- Serie temporal de temperaturas. Con Restricción  $\Delta Q_{\text{máx}} 5 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $Q_{\text{mín}}$  variables.

A pesar de que los IATI asociados a restricciones que permiten fluctuaciones máxima de  $5 \text{ m}^3/\text{s}$  son similares entre ellos independiente de la restricción de caudal mínimo que se le asocie, Figura 6.18, al analizar las series temporales de temperatura si se aprecian diferencias en término de la temperatura de salida, Figura 6.19, en donde para los caudales mínimos más estrictos ( $Q_{\text{mín}} 16$  y  $30 \text{ m}^3/\text{s}$ ) se tienen temperaturas mayores con respecto al resto de los casos. Esto es producto de que se ven favorecidas las condiciones de mezcla con las zonas de mayor temperatura dados los mayores requerimientos de volúmenes que estas restricciones generan. A pesar de esto, los IATI de la Figura 6.18 son similares entre sí dado que la variación de temperaturas entre horas consecutivas es baja producto de que las operaciones que tienen permitidas fluctuaciones máximas horarias de  $5 \text{ m}^3/\text{s}$  no permiten grandes cambios de los volúmenes vertidos en horas contiguas.

A partir del  $\text{Promedio}_{20-95\%}$  es posible comparar los IATI y ver el efecto que tienen las restricciones en la operación en la temperatura de salida. En la Figura 6.20 se puede ver la similitud entre el  $\text{Promedio}_{20-95\%}$  de los IATI con los IATI, en donde se aprecia que mientras más restrictiva es la operación menores son los valores de los IATI.

De los IATI obtenidos no es posible determinar cual restricción por sí sola genera valores menores para los indicadores dada la similitud entre las curvas obtenidas, pero en ambas restricciones se observa que mientras más se restringe la operación se tienen valores menores de los IATI. Al analizar los resultados de las restricciones en conjunto se puede ver que al aplicar restricciones de caudales mínimos altos ( $Q_{\text{mín}} 16$  y  $30 \text{ m}^3/\text{s}$ ) y

agregarles limitaciones a las fluctuaciones horarias no se tienen mejoras en comparación a los casos donde sólo se restringen los caudales mínimos, por lo que en esos casos las restricciones de fluctuaciones máximas horarias no son relevantes y no generan cambios en los IATI. Lo anterior es producto de que los meses observados corresponden al periodo seco, en los que se tiene una menor disponibilidad del recurso por lo que la restricción de caudal máximo es la que altera principalmente la operación. Para los caudales menores los IATI tienen el mismo comportamiento de los IATI, en donde mientras más restrictivo son los escenarios menores son los valores de los indicadores. En términos generales se tiene que si los valores de los IATI disminuyen también disminuyen los valores de los IATI (con respecto a los casos bases respectivos) existiendo excepciones como la descrita anteriormente.

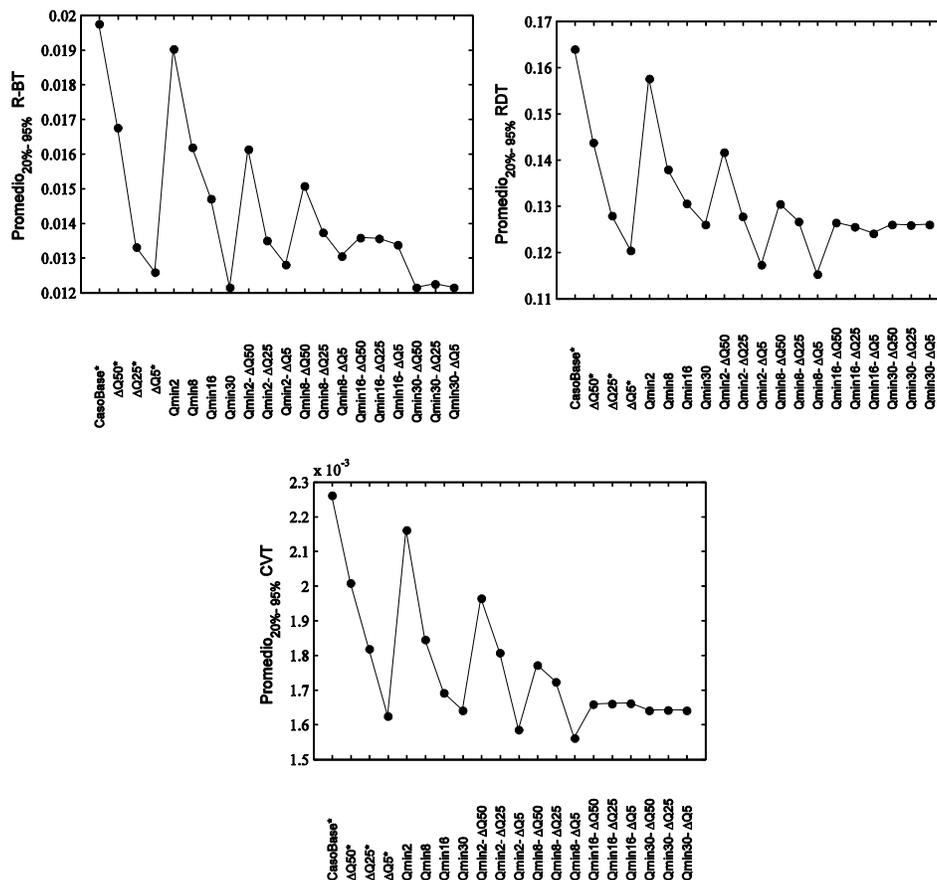


Figura 6.20.- Valores representativos para los IATI. Periodo 2011.

Dado que no se poseen registros de un régimen natural de temperatura horaria aguas abajo del embalse Rapel, no es posible determinar que restricción es mejor o en otras palabras se acerca más al comportamiento de la temperatura aguas abajo del embalse para la situación sin embalse. Por esto sólo es posible determinar si una restricción genera mayores o menores fluctuaciones con respecto al Caso Base\* establecido.

Los efectos de la operación en el perfil de temperatura del embalse dependen del caudal extraído y la frecuencia con la que se tienen variaciones en la operación. Para la situación

base se tiene que la estratificación se encuentra sobre la zona de extracción del embalse razón por la que una restricción que implica utilizar volúmenes constantes elevados ( $Q_{mín16}$  o  $Q_{mín30}$ ) va a generar mezcla con las aguas que se encuentran a mayor temperatura más cerca de la superficie.

## 7. ANÁLISIS Y CONCLUSIONES

### 7.1. Análisis Multiobjetivo

Mediante el análisis multiobjetivo se analizan los IAHI y los IATI de manera conjunta para determinar si existe una frontera de Pareto eficiente y ver si existen restricciones inferiores con respecto a otras. Para determinar un parámetro de comparación se toman los Promedios<sub>20-95%</sub> de los distintos indicadores de cada restricción y se comparan los indicadores equivalentes, es decir, R-B con R-BT, RTF con RDT y CVD con CVT.

En términos prácticos, dado que no se tiene un régimen térmico horario para una situación natural resulta difícil saber si es mejor en términos ambientales tener grandes o pequeñas fluctuaciones. Por lo que el enfoque se centra en determinar si menores alteraciones hidrológicas generan menores alteraciones en la temperatura de salida.

Tomando para las restricciones los valores promedio detallados anteriormente y normalizándolos con el Caso Base, se puede mostrar la forma en que interactúan ambos indicadores en la Figura 7.1. El resto de los análisis multiobjetivos se encuentran en el ANEXO D.

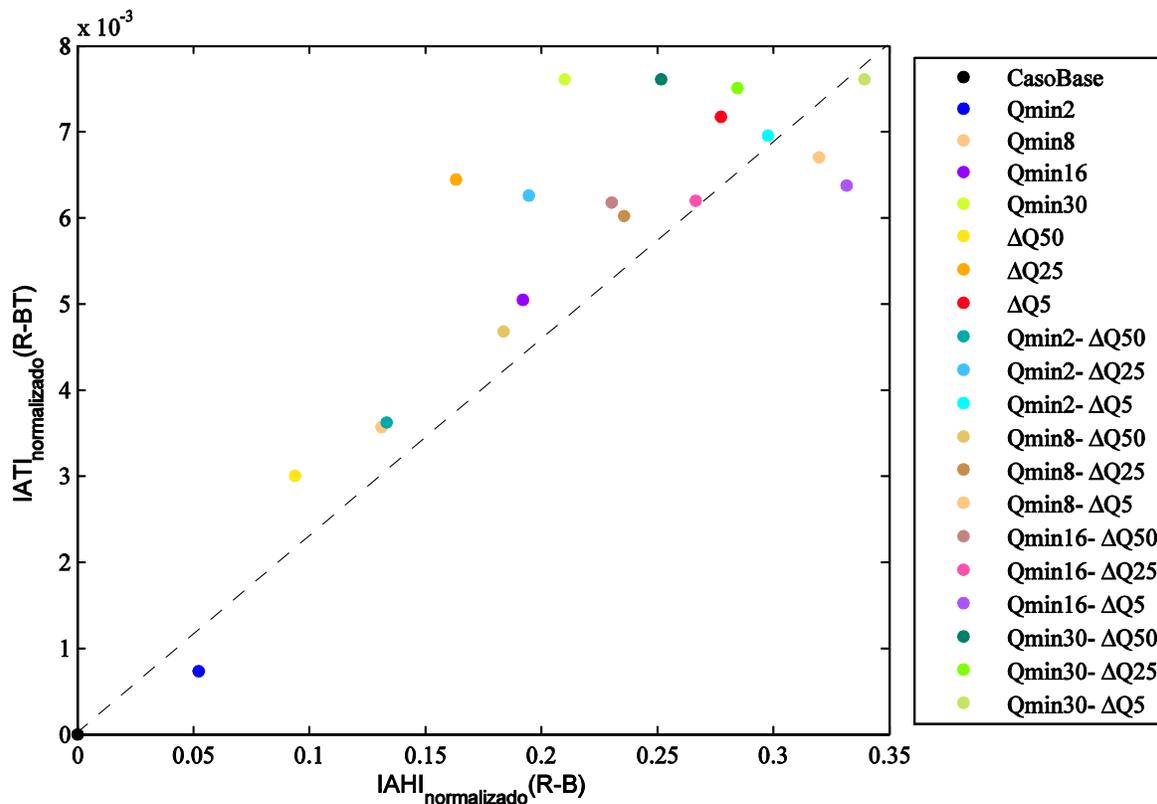


Figura 7.1.- Análisis multiobjetivo de las restricciones en la operación.

A partir de la Figura 7.1 se ratifica que las restricciones impuestas disminuyen las fluctuaciones tanto en el régimen hidrológico como en el régimen térmico con respecto al Caso Base. Producto de que se está trabajando con valores normalizados, una menor alteración tanto hidrológica como térmica está asociada a valores mayores de los indicadores normalizados, por lo que a partir del análisis multiobjetivo se puede ver que mientras menos restrictivas sean las operaciones impuestas mayores son los valores de los IATI y IAHI asociados.

En términos generales es posible determinar cuáles restricciones a la operación son mejores que otras, en donde por ejemplo hay restricciones que generan los mismos valores en los IATI pero diferentes en término de los IAHI. En esos casos se tienen soluciones inferiores, lo que se puede ver en las restricciones  $Q_{min16-\Delta 25}$ ,  $Q_{min16-\Delta 50}$ , en donde esta última es la que tiene asociada una mayor alteración hidrológica.

## 7.2. Conclusiones

A partir del análisis realizado de la operación horaria del embalse Rapel es evidente que esta central se caracteriza por tener una generación centrada en las horas punta o *hydropeaking*, con periodos en los que no opera y con fluctuaciones horarias que llegan hasta el 80% de la potencia máxima en periodos cortos de tiempo. Este tipo de operación altera significativamente el régimen hidrológico y potencialmente genera impactos negativos en los ecosistemas. Adicionalmente, el *hydropeaking* induce una alteración del comportamiento de la temperatura de salida del embalse y el perfil vertical de temperatura cerca del muro. Por estas razones, cada vez resulta más relevante para proyectos de este tipo evaluar los impactos ambientales asociados a la operación de corto plazo, así como posibles medidas de mitigación.

Al restringir la operación de la central Rapel, se observan mejoras en los IAHI tanto para las restricciones de caudal mínimo como para las restricciones de fluctuaciones máximas horarias. Las restricciones de caudal mínimo obligan a la central a operar de manera constante al valor mínimo impuesto en periodos en que ésta no lo haría al no tener restricciones. Este comportamiento se acentúa en el periodo seco en donde la central tiende a subir su piso de operación base y mantiene las fluctuaciones en las horas *peaks* si es que hay recurso disponible, lo que se traduce en una mayor cantidad de valores nulos para los IAHI. En el periodo húmedo al imponer restricciones de caudal mínimo se induce a una operación predominada por la generación en las horas punta y se tienen valores menores en los IAHI a mayor caudal mínimo impuesto. Al aplicar restricciones enfocadas en limitar las variaciones de caudal entre horas consecutivas, se tiene que a mayor fluctuación permitida, la operación tiende a ser más parecida a la operación del Caso Base. Esta restricción, al igual que la de los caudales mínimos genera valores menores de los indicadores en el periodo húmedo que en el periodo seco, debido a que se obliga a la central a operar antes de las horas punta de demanda para poder satisfacer los *peaks* sin exceder las fluctuaciones horarias permitidas por lo que se tienen menores variaciones horarias y un mayor caudal vertido. En términos generales, el comportamiento de los indicadores hidrológicos va a depender del periodo cuando se apliquen las restricciones. Para el periodo seco, los valores

menores están asociados a las restricciones de caudales mínimos, mientras que para el periodo húmedo los valores mínimos de los indicadores se encuentran asociados a las restricciones de fluctuaciones máximas horarias.

Aplicando restricciones combinadas de caudal mínimo y fluctuaciones máximas horarias, se obtienen valores menores en los indicadores hidrológicos que al tener las restricciones por sí solas, para todos los casos en ambos periodos. Al fijar una fluctuación máxima horaria y comparar su comportamiento al agregarle restricciones de caudales mínimos, se tiene una disminución en los indicadores mientras mayor sea el caudal mínimo impuesto. Al analizar el efecto de agregarle restricciones de fluctuaciones máximas horarias a un caudal mínimo se tiene una mejora en comparación con el caso de la restricción de caudal mínimo por sí sola. En términos generales si se analiza el periodo completo, si se quiere disminuir la alteración hidrológica y por ende los IAHÍ resulta más eficiente restringir las fluctuaciones de caudales máximos horarios turbinados que los caudales mínimos.

En cuanto a la alteración térmica que se produce aguas abajo, no se puede determinar si un caso se acerca más o no a la situación sin restricciones, dado que no se tiene un registro horario de las temperaturas de los afluentes a Rapel. Los indicadores de alteración térmica intradiaria definidos en este trabajo, se obtienen a partir de datos de meteorológicos y batimétricos del 2010 y de la operación horaria e hidrología del 2011 (dado que no se tienen los datos necesarios para un mismo periodo) y permiten determinar cómo las distintas operaciones pueden influenciar la temperatura de salida del embalse. Los resultados muestran que se obtiene que los IATI poseen un comportamiento similar de los IAHÍ, donde mientras más restringida es la operación menores variaciones horarias en la temperatura y en los caudales horarios. En término de los IATI, al aplicar las restricciones de caudales mínimos y fluctuaciones máximas horarias de manera independiente dada la similitud de las curvas generadas no resulta directo determinar que restricción genera valores menores para los IATI. Al aplicar las restricciones de caudales mínimos, mientras mayor es la restricción impuesta, las curvas generadas se encuentran desplazadas hacia el eje de las ordenadas con respecto a la curva asociada al Caso Base\*. Con las restricciones de fluctuaciones máximas horarias se aprecia un comportamiento similar al Caso Base\* un 30% de la frecuencia acumulada, los que corresponden a los valores más bajos de los IATI y coinciden con los periodos en donde la operación es constante. Por lo que operaciones constantes tienen asociados valores menores de los IATI. Al ver en conjunto ambas restricciones el comportamiento de la IATI es similar al comportamiento de los IAHÍ, en donde combinaciones de operaciones más restrictivas generan menores valores en los indicadores, excepto al agregarle restricciones de fluctuaciones horarias a las restricciones de caudales mínimos de 16 y 30 m<sup>3</sup>/s. En estos últimos escenarios al agregarle a los caudales mínimos restricciones de fluctuaciones horarias no se obtienen cambios en las curvas de duración de los indicadores, por lo que en términos generales sería más eficiente restringir el caudal mínimo antes que las fluctuaciones de caudales máximas horarias.

A partir de los indicadores se tiene que la diferencia de temperaturas máxima y mínima en un día no supera los 0.5°C, por lo que el efecto de la operación no tiene una implicancia directa sino más bien un efecto acumulativo. Al aplicar las restricciones durante un periodo estratificado se tiene que mientras mayor es la intensidad de la descarga, mayor es la temperatura horaria de salida. En las restricciones de caudales mínimos altos (16 y 30 m<sup>3</sup>/s)

se aprecian variaciones de hasta 2°C con respecto a la temperatura de salida del Caso Base\*. Las series temporales de temperatura tienen un patrón similar de fluctuaciones excepto por la temperatura asociada a la restricción de  $\Delta Q_{\text{máx}} 5 \text{ m}^3/\text{s}$ , la que genera temperaturas de salida menores que las del Caso Base\*, esto se puede adjudicar a que esta restricción obliga a la central a operar menos que el resto de los casos, por lo que el volumen extraído no logra inducir condiciones de mezcla con las zonas superficiales que se encuentran a mayor temperatura.

Para ambos indicadores, a partir de las curvas de duración no es directo determinar cuál restricción es mejor que otra, por lo que mediante un análisis multiobjetivo es posible descartar algunas por ser peores que otras restricciones, pero se requiere considerar otros criterios u objetivos para poder determinar una operación óptima del sistema como factores económicos y ambientales que muestren el efecto que produce aplicar restricciones en la operación de Rapel en el resto de las centrales que forman parte del SIC, entre otras cosas, razón por la que se deben seguir desarrollando estudios en esta materia que logren incorporar la mayor cantidad de variables posibles para utilizar el recurso lo más eficientemente posible con la menor cantidad de impactos al medio ambiente.

### **7.2.1. Limitaciones y Trabajos Futuros**

Dentro de las limitaciones de este trabajo se puede mencionar que la programación utilizada por el CDEC-SIC considera para cada semana las condiciones reales observadas como condiciones iniciales. Dado que la operación programada no coincide siempre con la operación real en este caso se asume que lo programado es efectivamente lo que sucedería en el embalse y dado que los IAHI asociados a la operación programada son menores que los asociados a la operación real, si se mejoran los IAHI de la operación programada por defecto se estarán mejorando los indicadores asociados a la operación real. Otra de las consideraciones que hay que tener presente es que la función de costos futuros utilizada no consideran las restricciones a la operación, pero dado que sólo se aplican restricciones a uno de todas las centrales que forman parte de SIC, se espera que no se vea alterada de manera considerable las funciones de costos futuros.

Dado que no se tienen los datos para el periodo estival del año 2010 para el modelo MIPUC, ni los datos para el modelo tridimensional CWR-ELCOM para el periodo estival del año 2011, no es factible hacer un análisis del efecto real que se hubiese tenido al aplicar restricciones de operación en la temperatura de salida del embalse para un mismo año. Sin embargo, dado que la estratificación se produce todos los veranos, que las demandas entre años consecutivos son similares, que en los meses estivales la operación es nula más de la mitad del tiempo y que las condiciones atmosféricas son parecidas, se asume que la temperatura de salida asociada a las distintas restricciones no se verá afectada al tomar condiciones iniciales de un año distinto.

Como propuestas de trabajos futuros, es interesante tener registros horarios de los caudales y temperaturas afluentes al embalse, para poder determinar cómo se comportan los indicadores con respecto a un régimen natural e incluir un análisis de costos y precios. También resulta interesante ver el comportamiento de los embalses al incorporar formas de

energías fluctuantes como la eólica o mini centrales hidroeléctricas y aplicar restricciones a la operación de las centrales actualizando las funciones de costos futuros obtenidas a partir del modelo de largo plazo.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Antenucci, Jason (1996). "Hydrobiological Modelling of Rapel Reservoir, Central Chile". Department of Environmental Engineering, The University of Western Australia.
2. Avilés, Nicolás. (2011). "Estudio y mejoramiento de un modelo de predespacho aplicado a la operación de embalses hidroeléctricos del Sistema Interconectado Central". Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile.
3. Baker D.B, Richards R.P., et al (2004). "A new flashiness index: characteristics and applications to Midwestern rivers and streams." *Journal of the American Water Resources Association* 40, pp. 503-522.
4. Cade-Idepe. (2004). "Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivo de calidad. Cuenca del río Rapel". Dirección General de Aguas.
5. Caissie, D. (2006). "The thermal regime of rivers: a review". *Freshwater Biology*. Vol. 51, pp. 1389-1406.
6. de la Fuente, Alberto (2003) "Modelación Hidrodinámica del Sistema Ambiental del Embalse Rapel". Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile.
7. Dirección General de Aguas (DGA). Marzo 2012. Proyecto de Reglamento Para la Determinación del Caudal Ecológico Mínimo. Ministerio Medio Ambiente
8. Fernández, Mauricio (2012). "Estudio del grado de alteración hidrológica por operaciones de corto plazo de centrales hidroeléctricas del embalse del sistema interconectado central". Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile.
9. García, A., et al (2011). "Downstream environmental effects of dam operations: changes in habitat quality for native fish species". Center of Environmental Sciences EULA-Chile, Universidad de Concepción.
10. Ibarra, Germán (2011). "Efecto de la Operación Intradiaria de la Central Hidroeléctrica Rapel en la Hidrodinámica del Embalse". XX Congreso Chileno de Hidráulica.

11. Ibarra, et al (2012) "Effect of the hydropeaking operation on the hydrodynamics of a stratified reservoir: Rapel reservoir, Central Chile". Departamento Ingeniería Civil Universidad de Chile.
12. Jackson, H., Gibbins, C., Soulsby, C (2007) "Role of discharge and temperature variation in determining invertebrate community structure in a regulated river". Wiley InterScience.
13. Lundquist, Jessica, Cayan, Daniel (2002). "Seasonal and spatial Patterns in diurnal cycles in streamflow in the western United State". *Journal of Hydrometeorology*3, pp. 591-603.
14. McKinney T., Speas D.W, et al (2001). "Rainbow trout in a regulated river below Glen Canyon Dam, Arizona, following increased minimum flows and reduced discharge variability." *North American Journal of Fisheries Management* 21, pp 216-222.
15. Martínez, et al. (2003) "Modelos conceptuales de abundancia de fitoplancton asociados a la heterogeneidad espacial en el Embalse Rapel (Chile central)".
16. Moog, O. (1993). "Quantification of daily peak hydropower effects on aquatic fauna and management to minimize environmental impacts" Department of hydrobiology, State University of agriculture, Vienna, Austria.
17. Olden, Julien D., Naiman Robert (2010). "Incorporating thermal regimes into environmental flows assessments: modifying dam operation to restore freshwater ecosystem integrity". *Freshwater Biology*. Vol. 55, pp. 86-107.
18. Palacios, Eugenio. (2004). "Modelo para Manejo de la Incertidumbre Hidrológica en la Planificación de la Operación del SIC". Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Electricista. Universidad de Chile
19. Richter, B. D., Baumgartner, J. V., et al. (1996). "A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems." *Conservation Biology*, Vol. 10(4), pp. 1163-1174.
20. Richter, B. D., Baumgartner, J. V., et al. (1997). "How much water does a river need." *Freshwater Biology*, pp. 231-249.
21. Steel, Ashley, Lange, Ian (2007). "Using wavelet analysis to detect changes in water temperature regimes at multiple scales: effects of multi-purpose dams in the Willamette river basin". Wiley InterScience, pp.352-359.

## **ANEXOS**

## ANEXO A: INDICADORES DE ALTERACIÓN HIDROLÓGICA INTRADIARIOS OPERACIÓN REAL Y PROGRAMADA CDEC-SIC

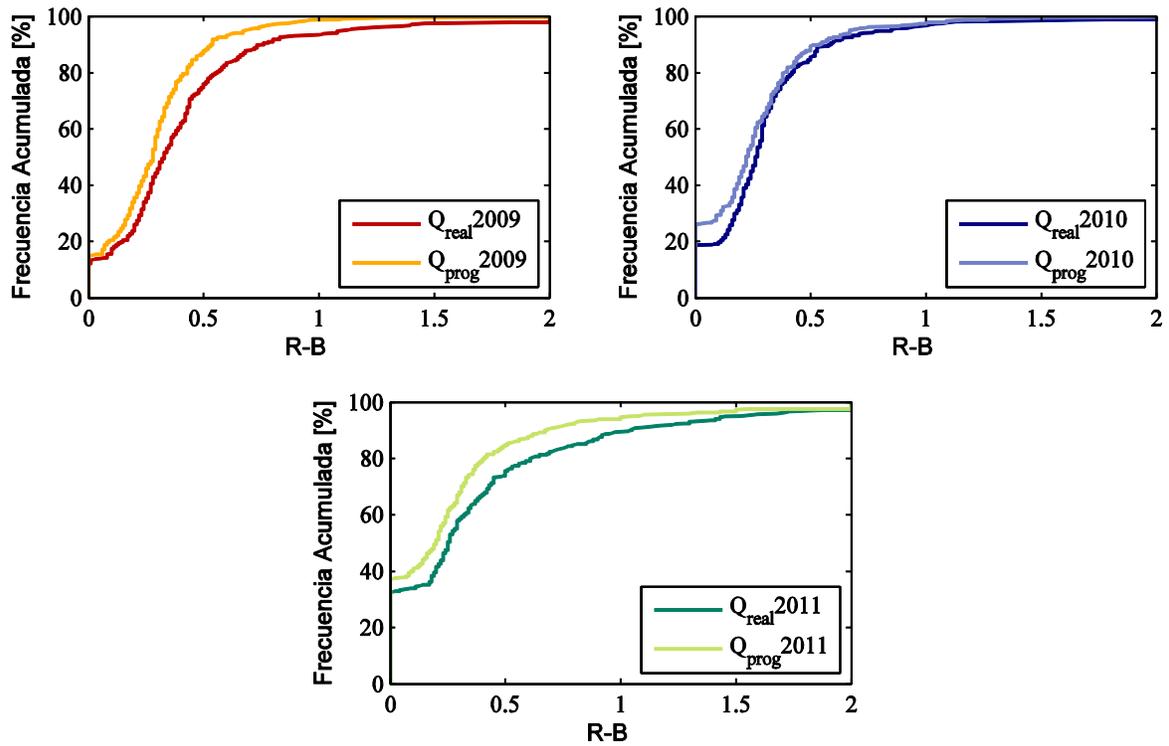


Figura A. I.- Indicador R-B. Operación real y programada 2009, 2010 y 2011.

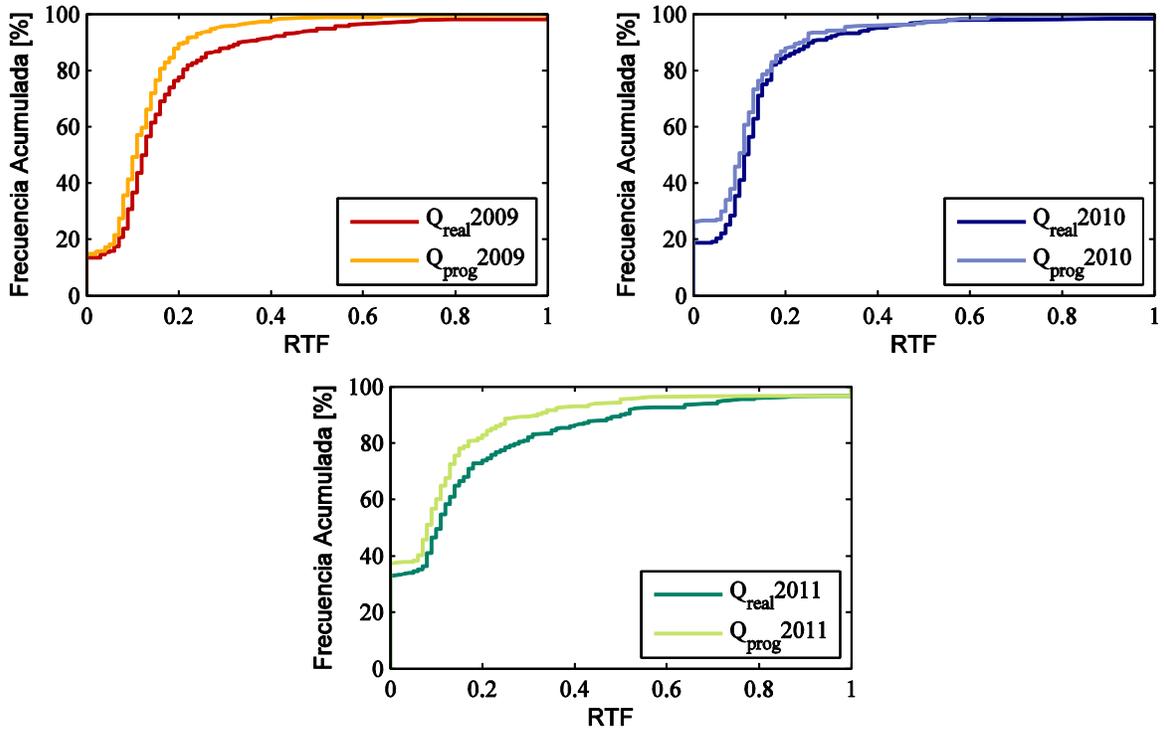


Figura A. II.- Indicador RTF. Operación real y programada 2009, 2010 y 2011.

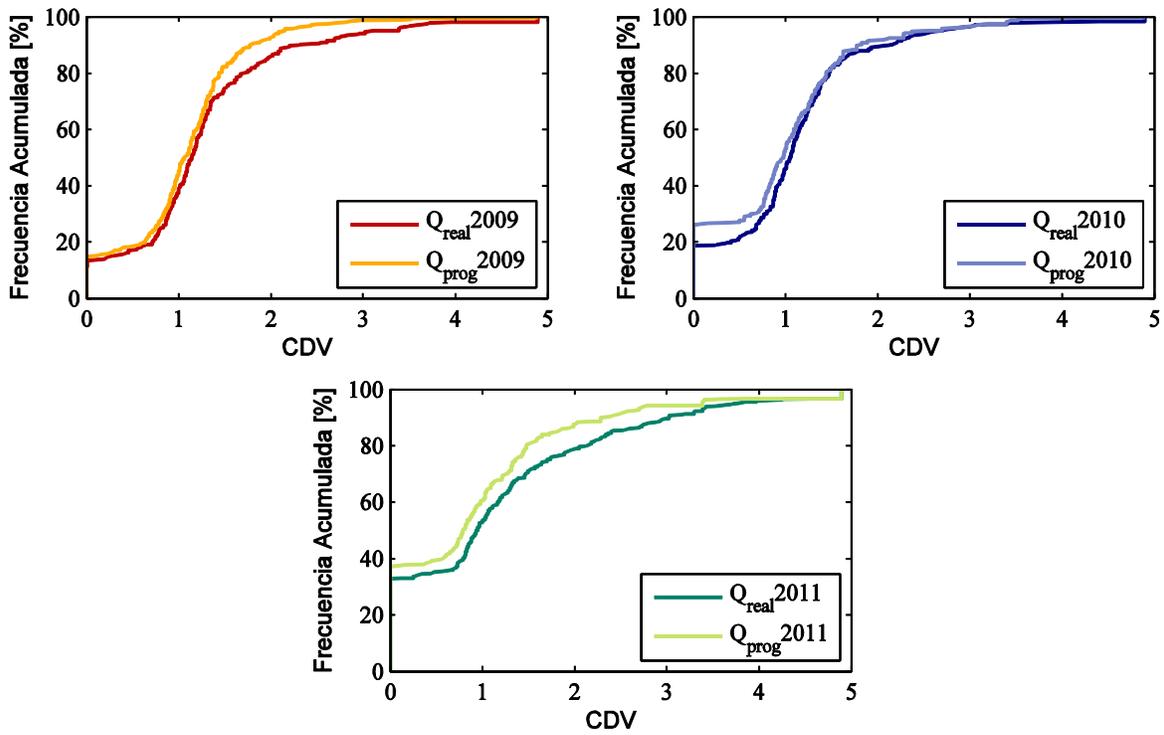


Figura A. III.- Indicador CDV. Operación real y programada 2009, 2010 y 2011.

# ANEXO B: INDICADORES DE ALTERACIÓN HIDROLÓGICA INTRADIARIOS

## PERIODO SECO

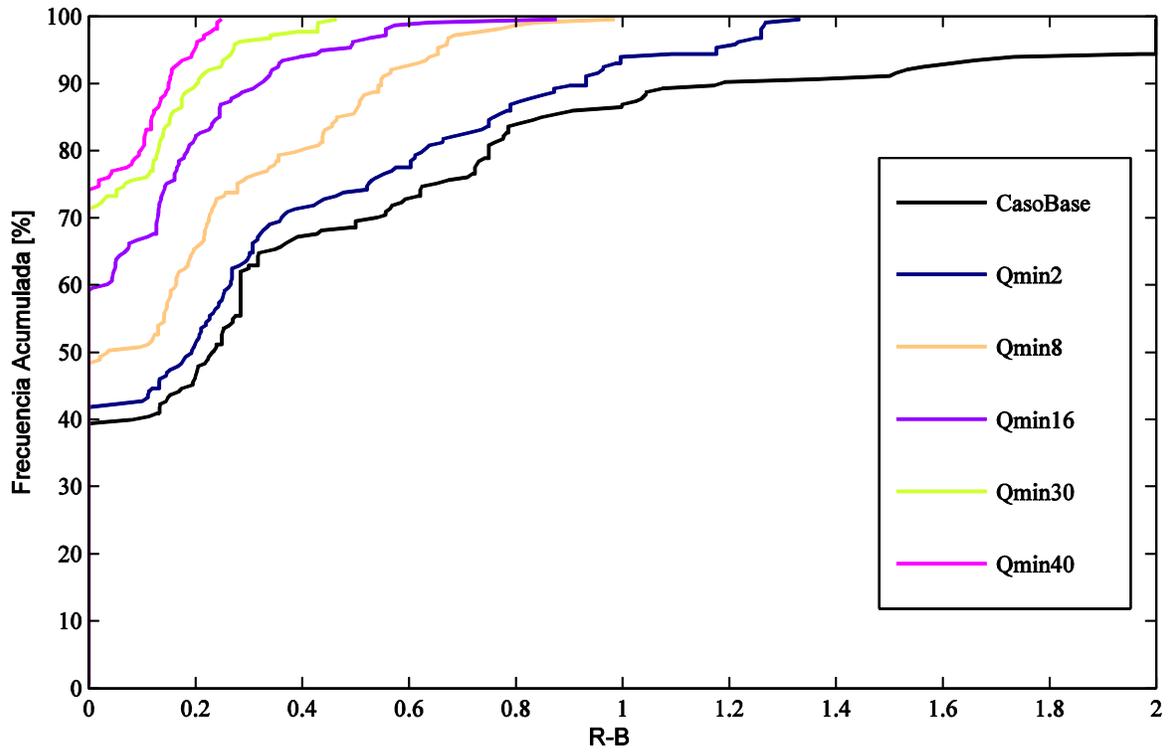


Figura B. I.- Indicador R-B. Restricción Qmín.

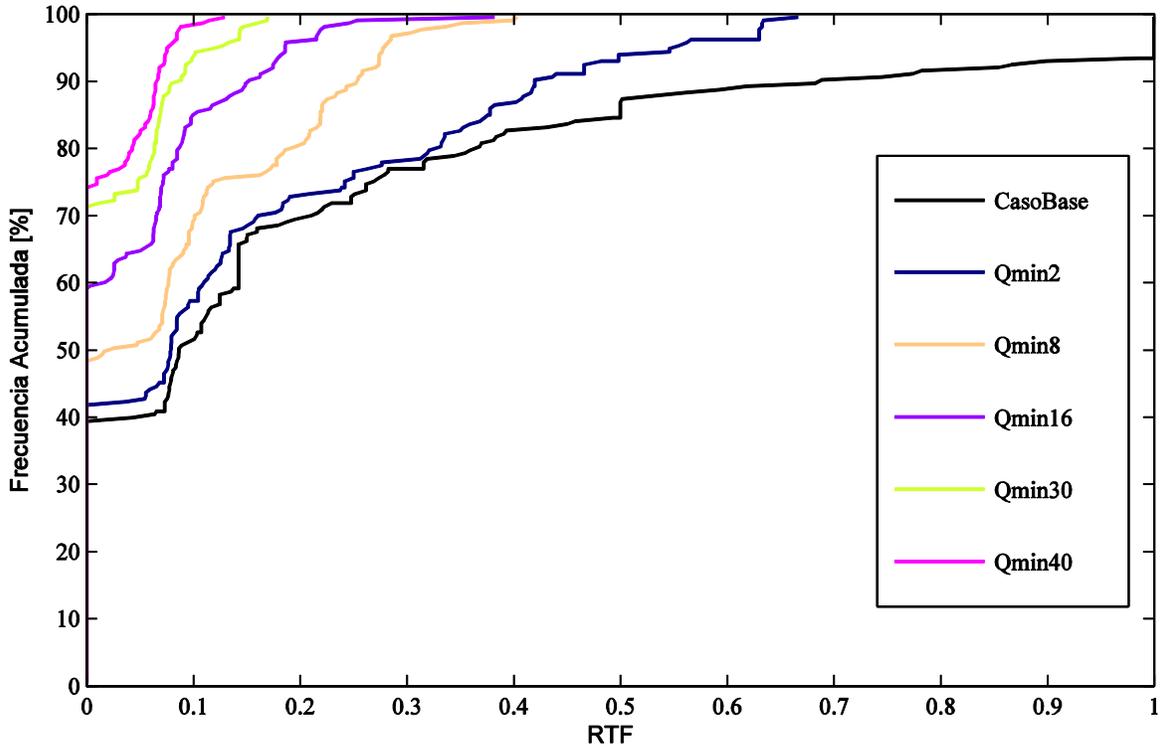


Figura B. II.- Indicador RTF. Restricción Qmín.

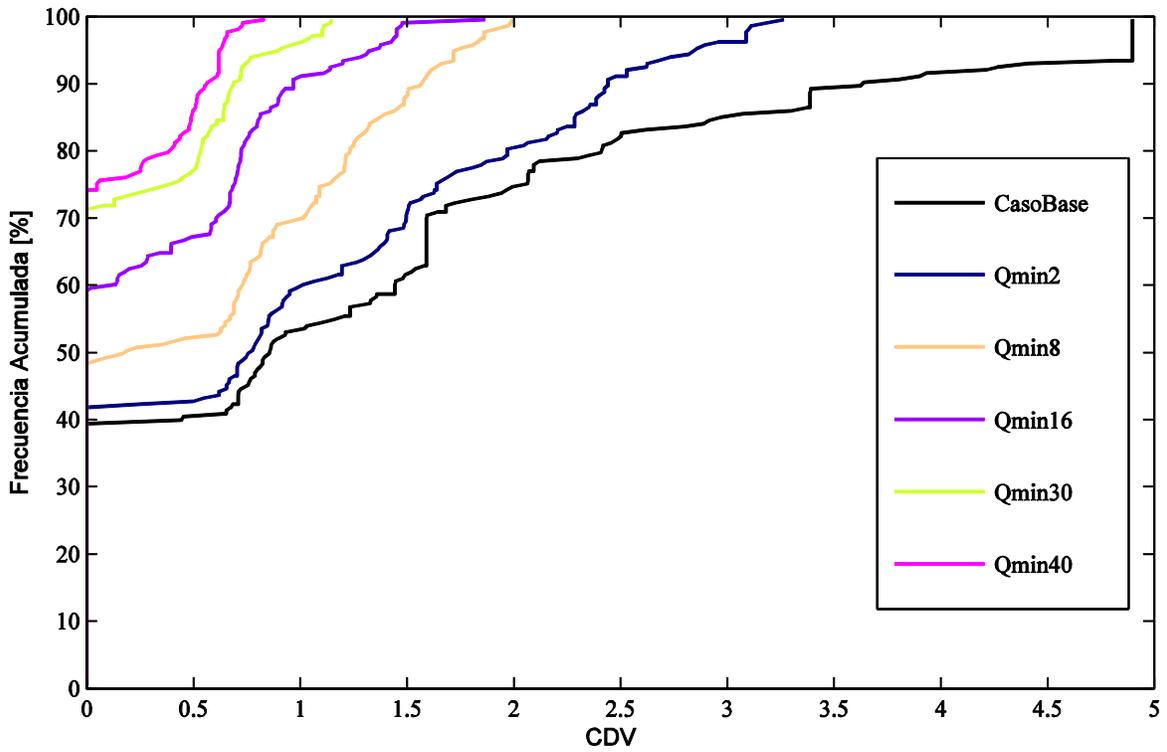


Figura B. III.- Indicador CDV. Restricciones Qmín.

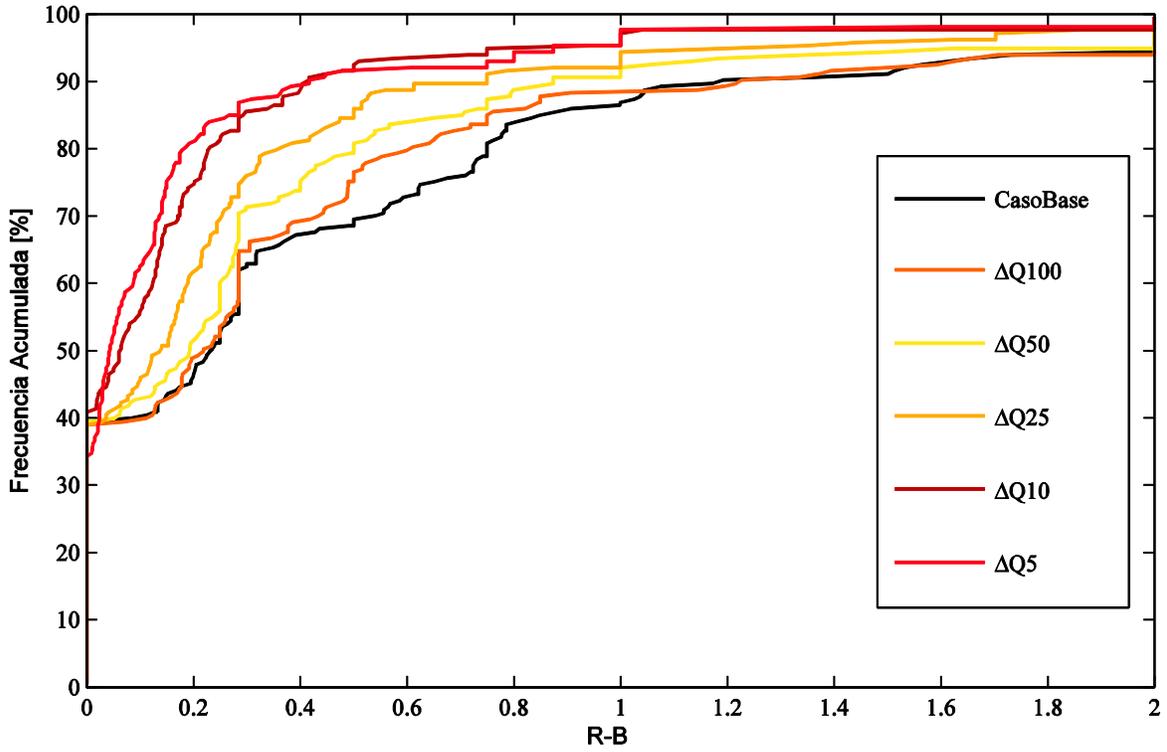


Figura B. IV.- Indicador R-B. Restricción  $\Delta Q_{\text{m\acute{a}x}}$ .

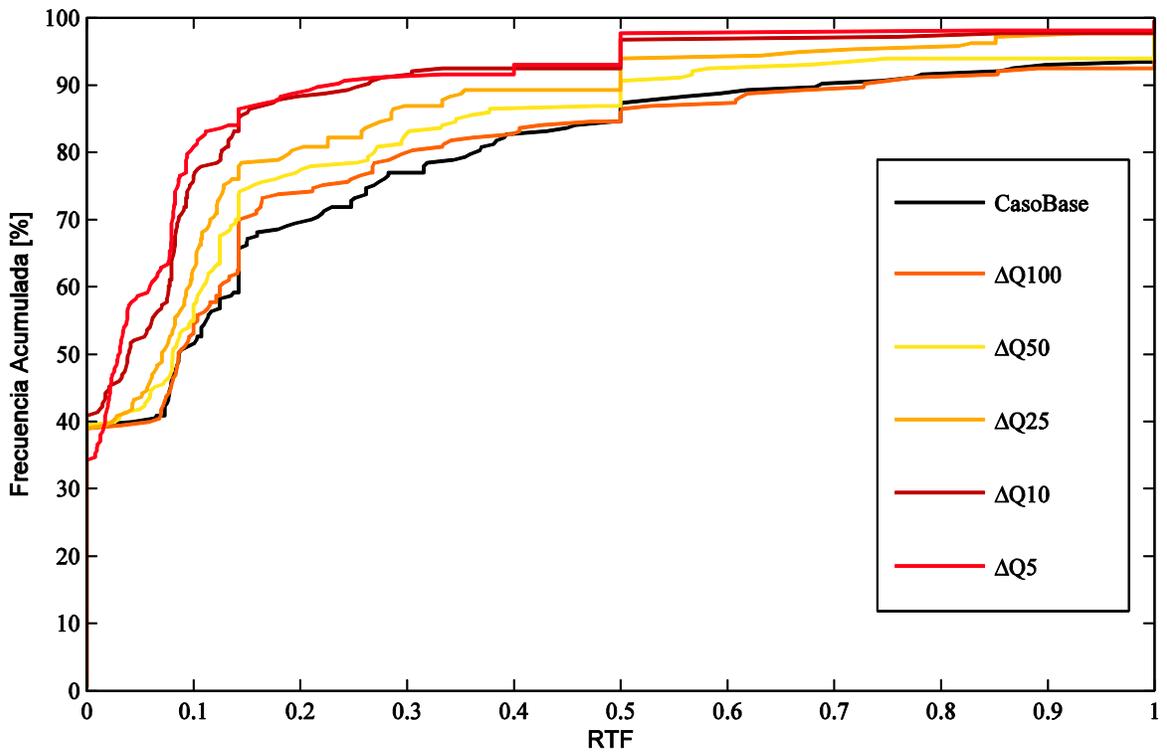


Figura B. V.- Indicador RTF. Restricciones  $\Delta Q_{\text{m\acute{a}x}}$ .

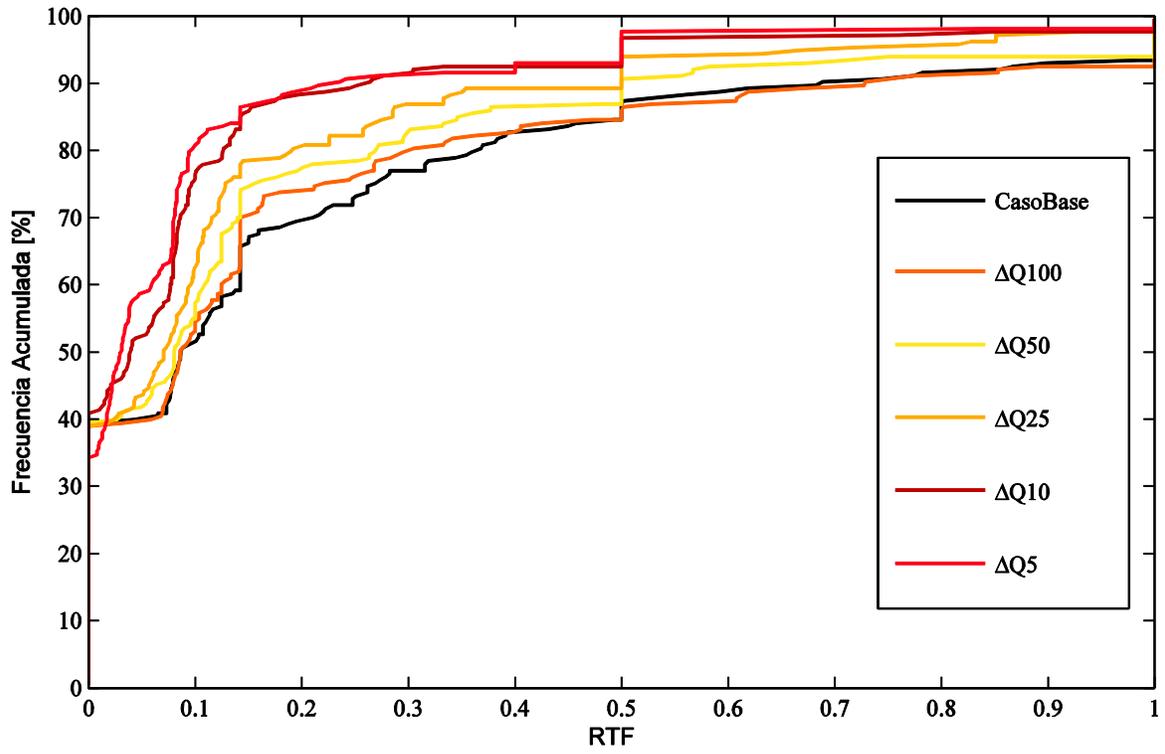


Figura B. VI.-Indicador CDV. Restricciones  $\Delta Q_{\text{m\acute{a}x}}$ .

## PERIODO HÚMEDO

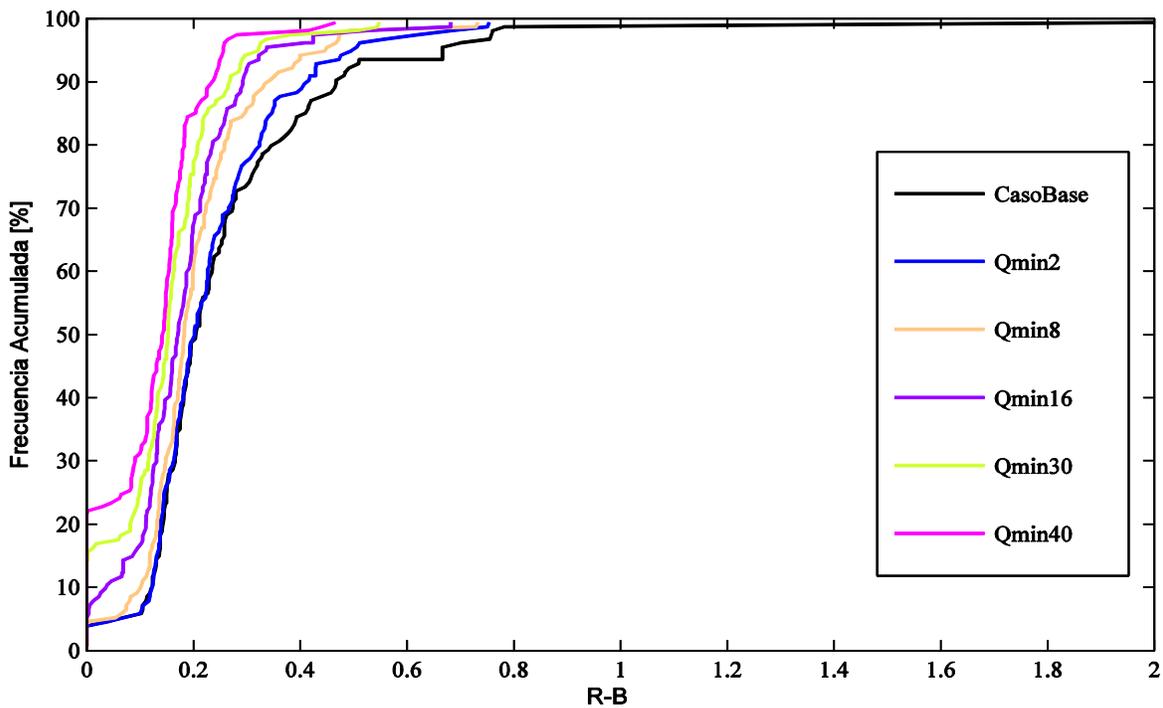


Figura B. VII.- Indicador R-B. Restricciones Qmín.

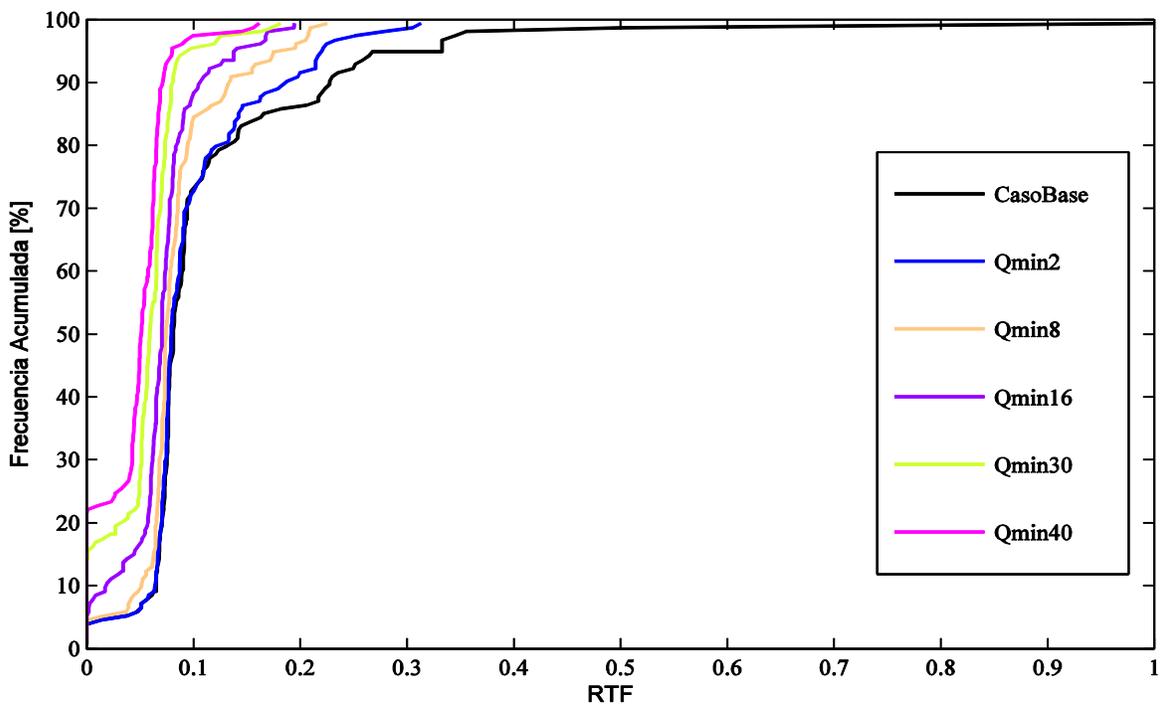


Figura B. VIII.-Indicador RTF. Restricciones Qmín.

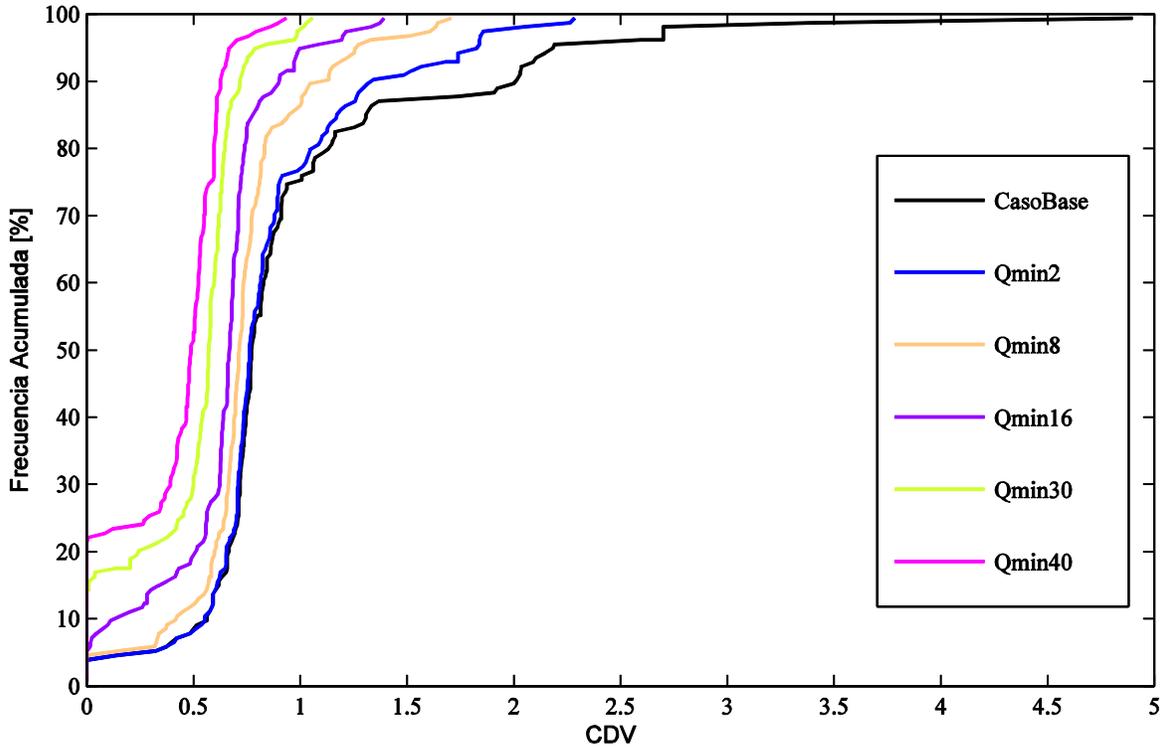


Figura B. IX.- Indicador CDV. Restricciones Q<sub>mín</sub>.

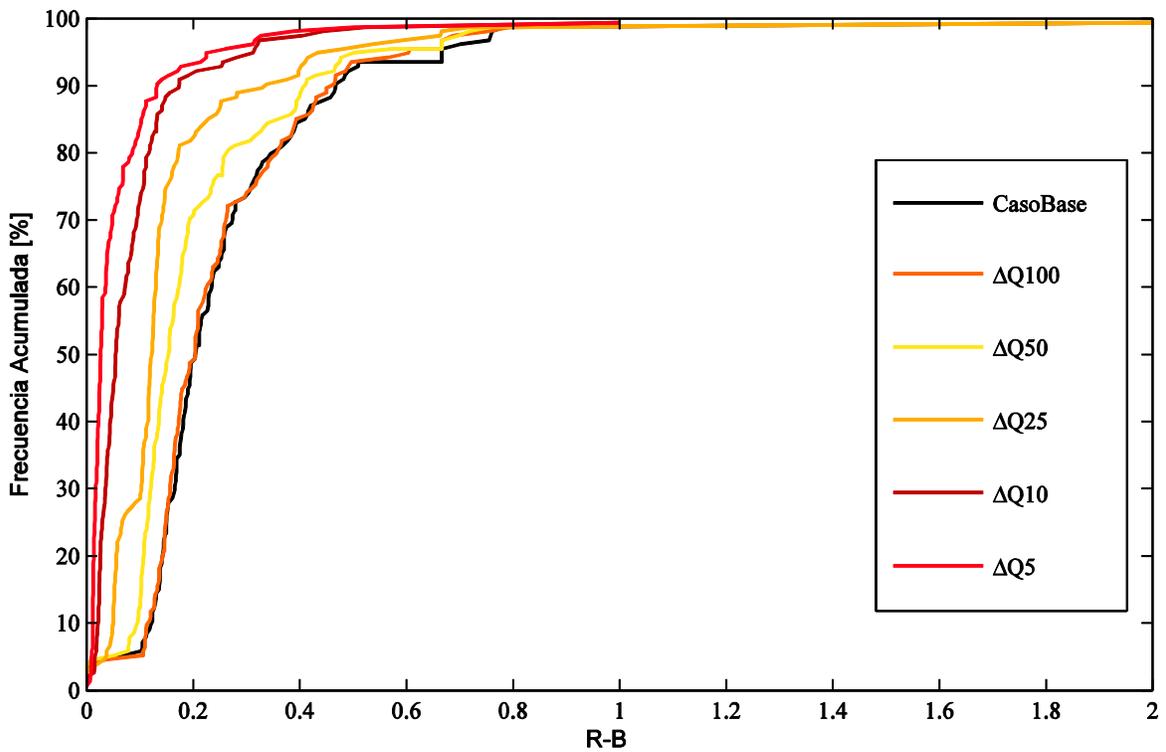


Figura B. X.-Indicador R-B. Restricciones  $\Delta$  Q<sub>máx</sub>.

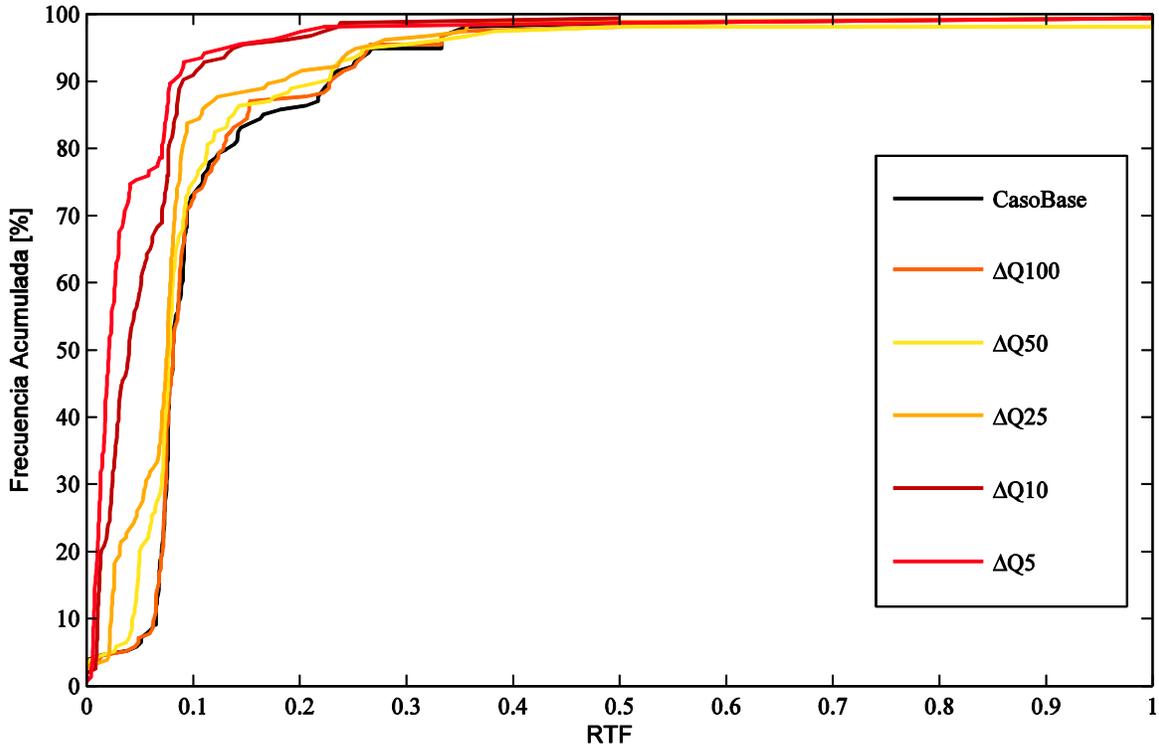


Figura B. XI.- Indicador RTF. Restricciones  $\Delta Q_{\text{m\acute{a}x}}$

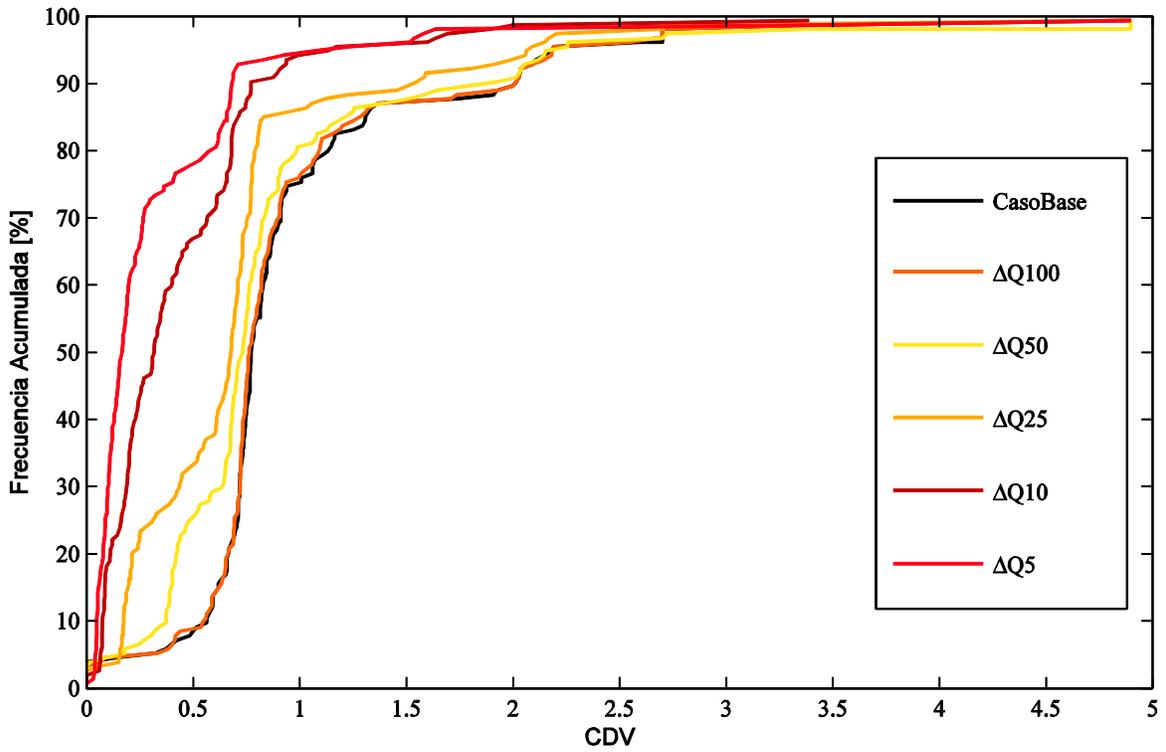


Figura B. XII.- Indicador CDV. Restricciones  $\Delta Q_{\text{m\acute{a}x}}$ .

PERIODO ANUAL

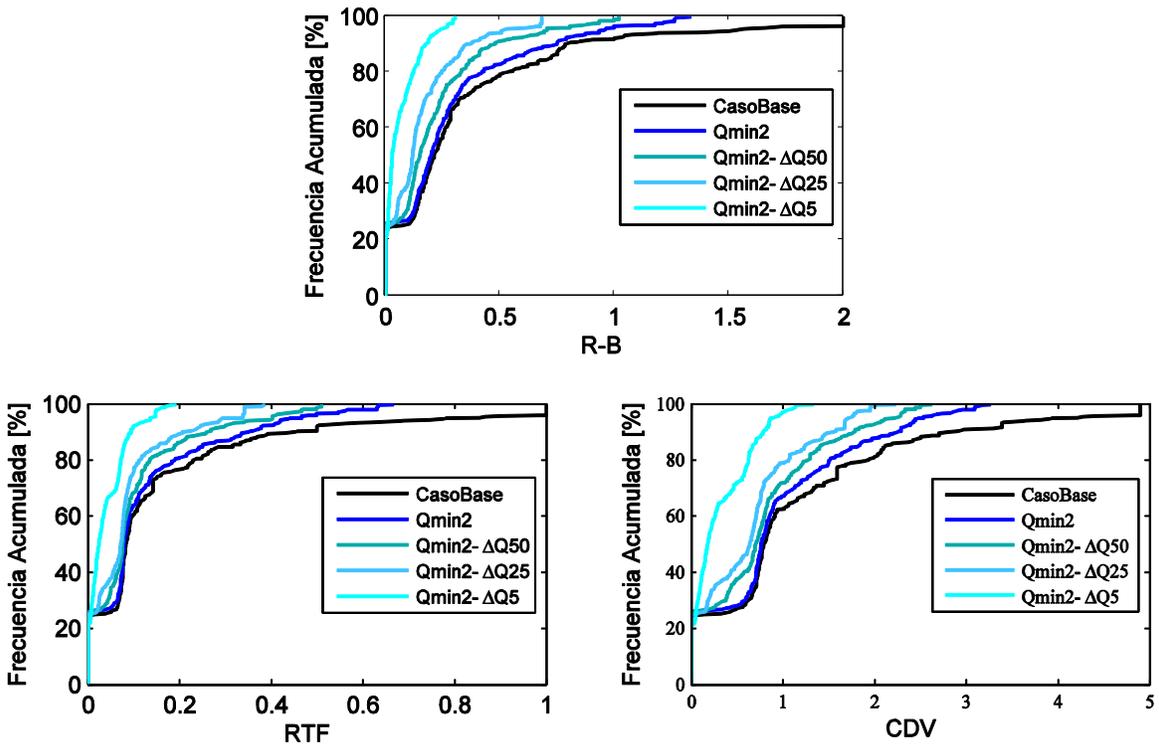


Figura B. XIII.- Indicadores Qmin2 constante variación intrahoraria variable. Año 2011.

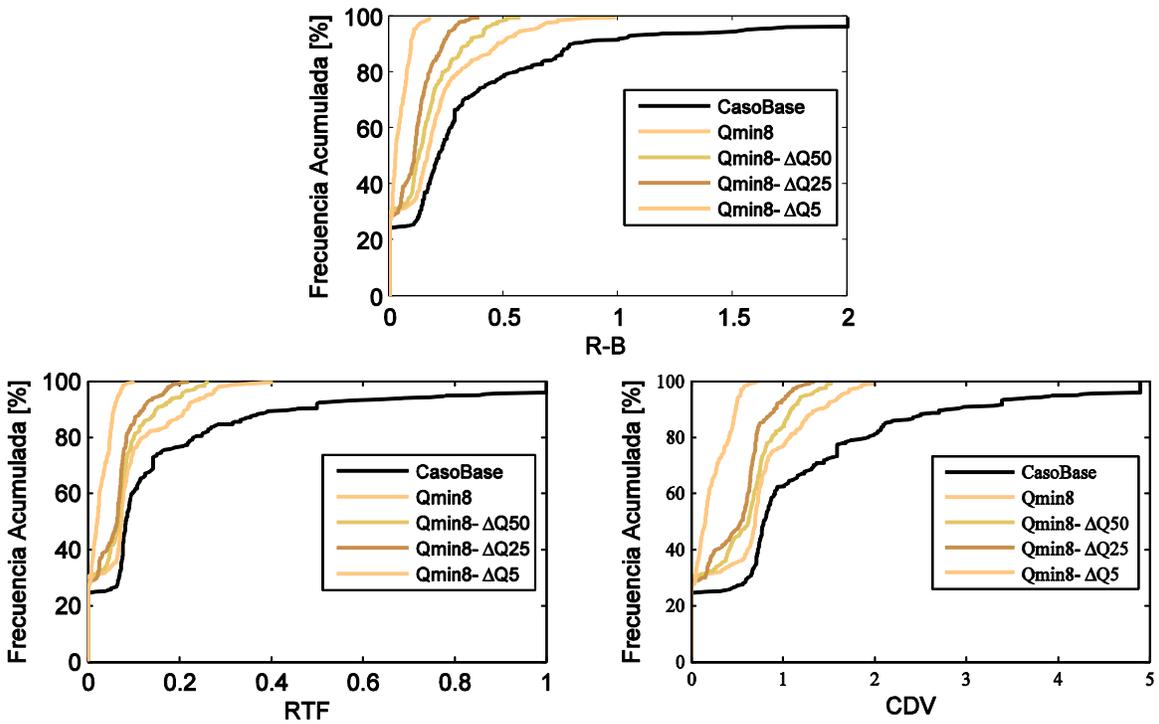


Figura B. XIV.- Indicadores Qmin8 constante variación intrahoraria variable. Año 2011.

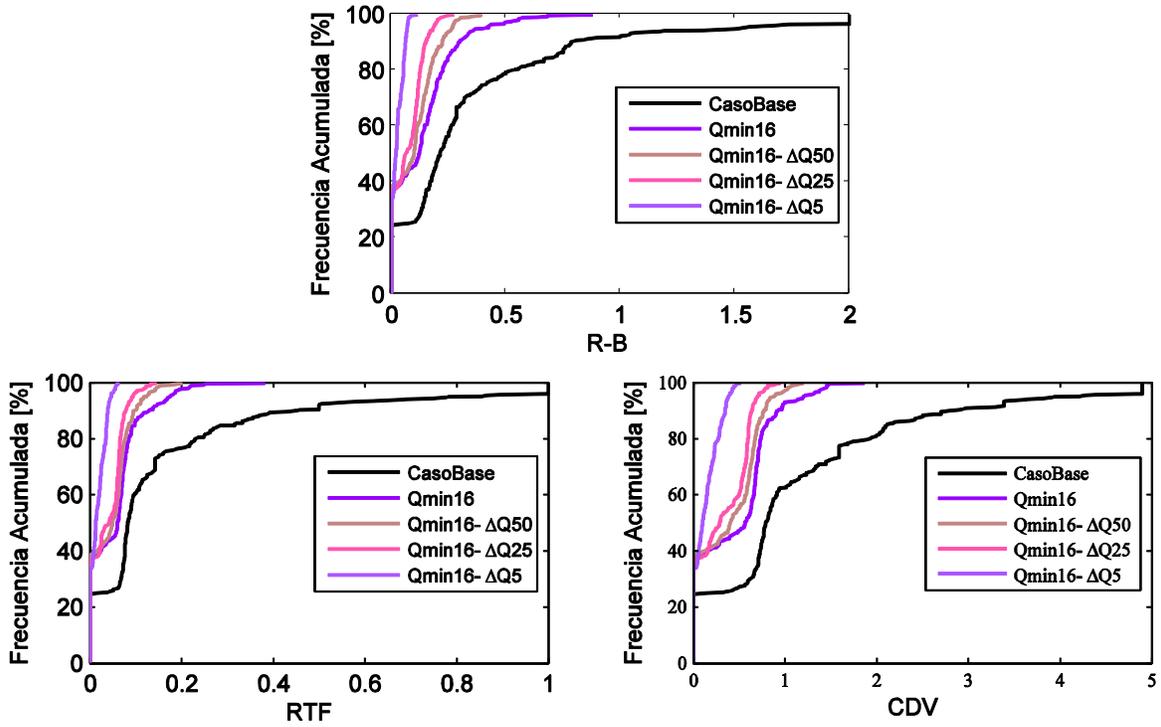


Figura B. XV.- Indicadores Qmin16 constante variación intrahoraria variable. Año 2011.

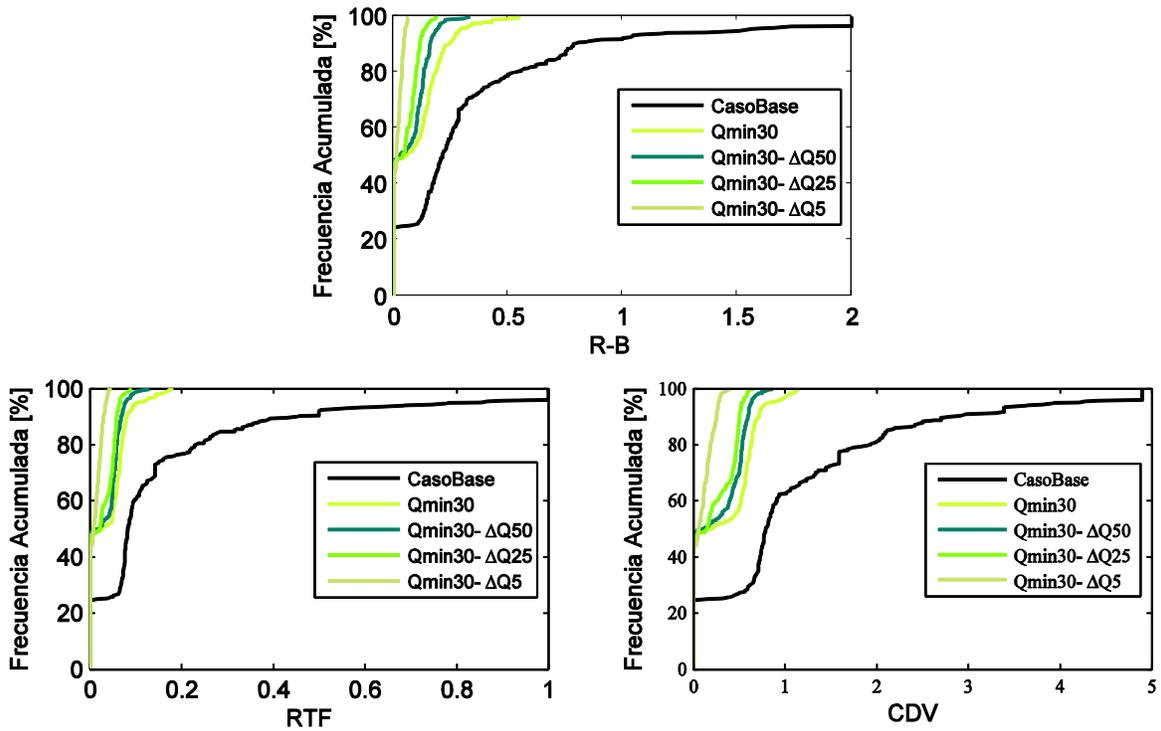


Figura B. XVI.- Indicadores Qmin30 constante variación intrahoraria variable. Año 2011.

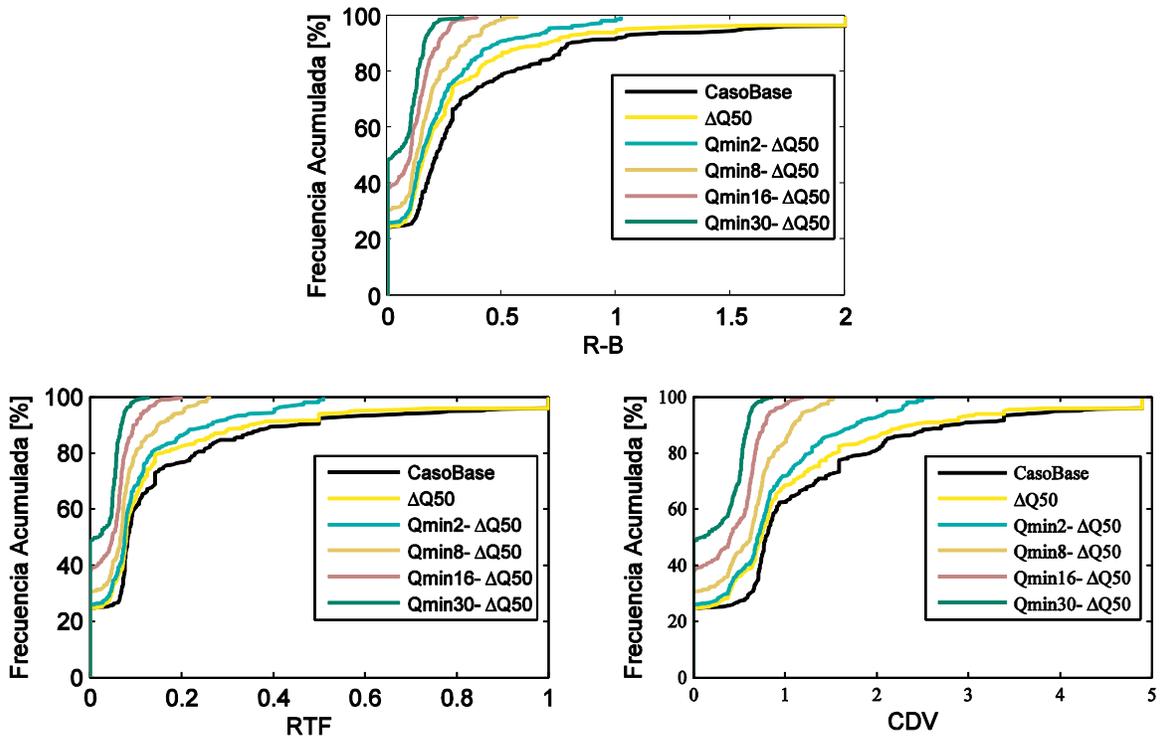


Figura B. XVII.- Indicadores  $\Delta Q50$  y  $Q_{\min}$  variable. Año 2011.

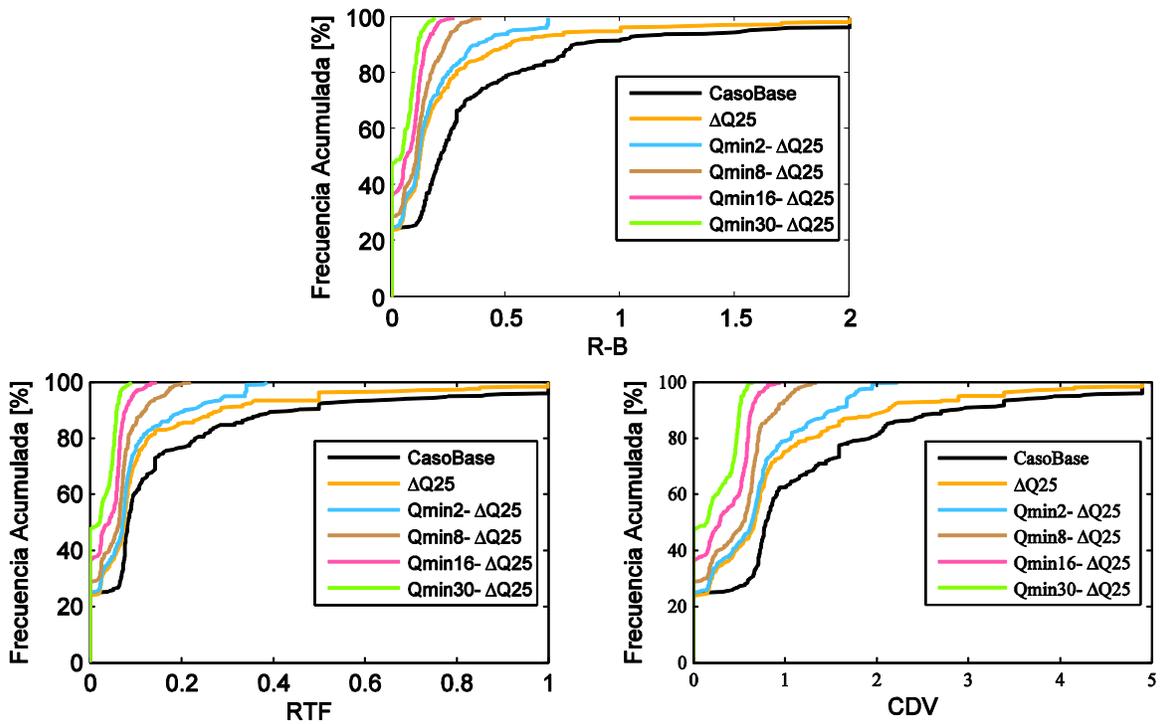


Figura B. XVIII.- Indicadores  $\Delta Q25$  y  $Q_{\min}$  variable. Año 2011.

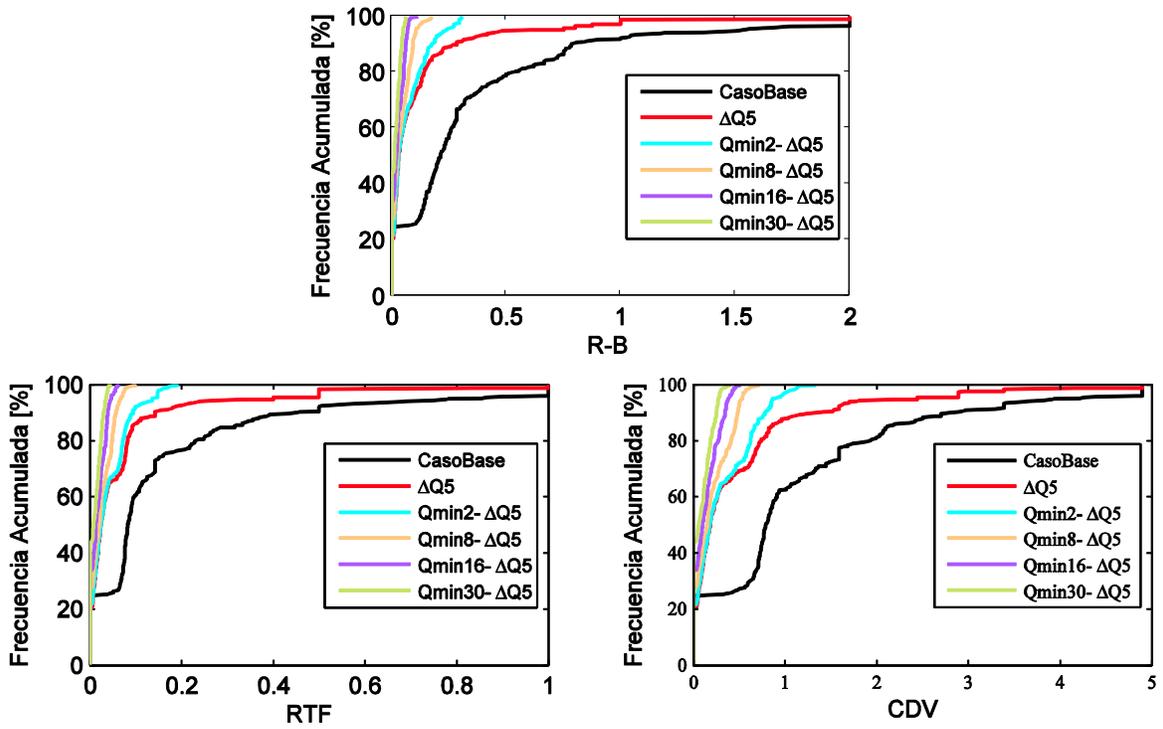


Figura B. XIX.- Indicadores  $\Delta Q5$  y  $Q_{min}$  variable. Año 2011.

# ANEXO C: INDICADORES DE ALTERACIÓN TÉRMICA INTRADIARIA

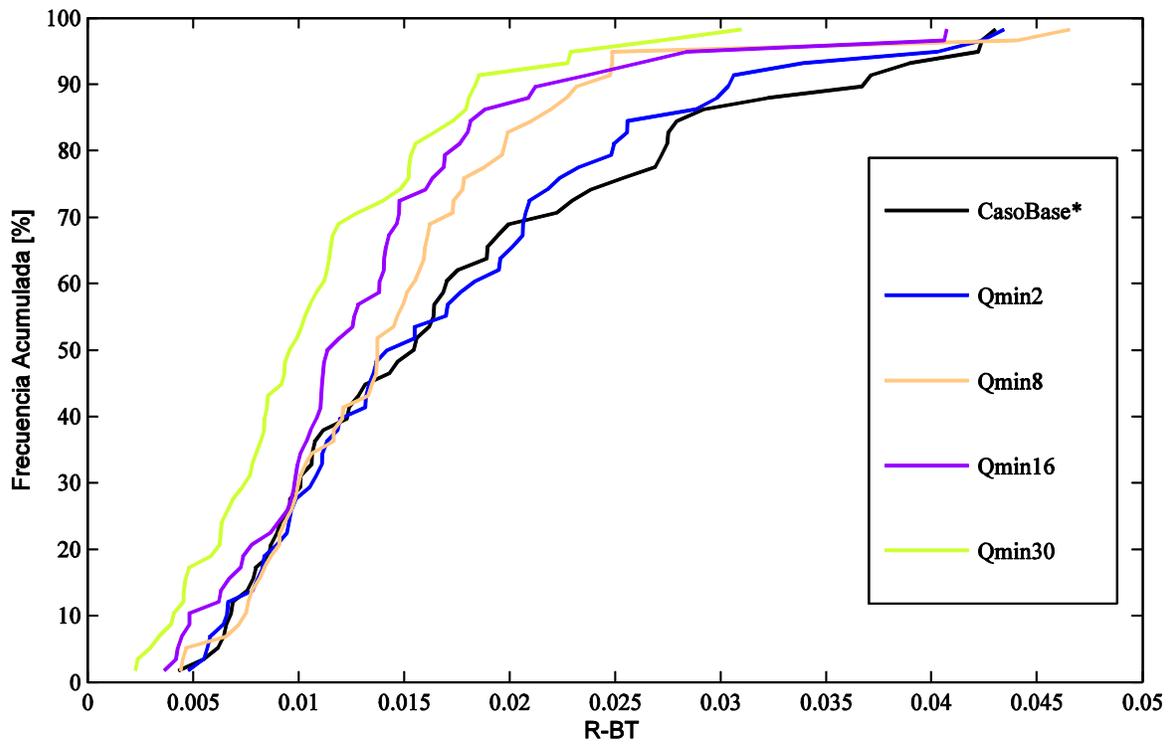


Figura C. I.- Indicador R-BT. Restricciones Qmín.

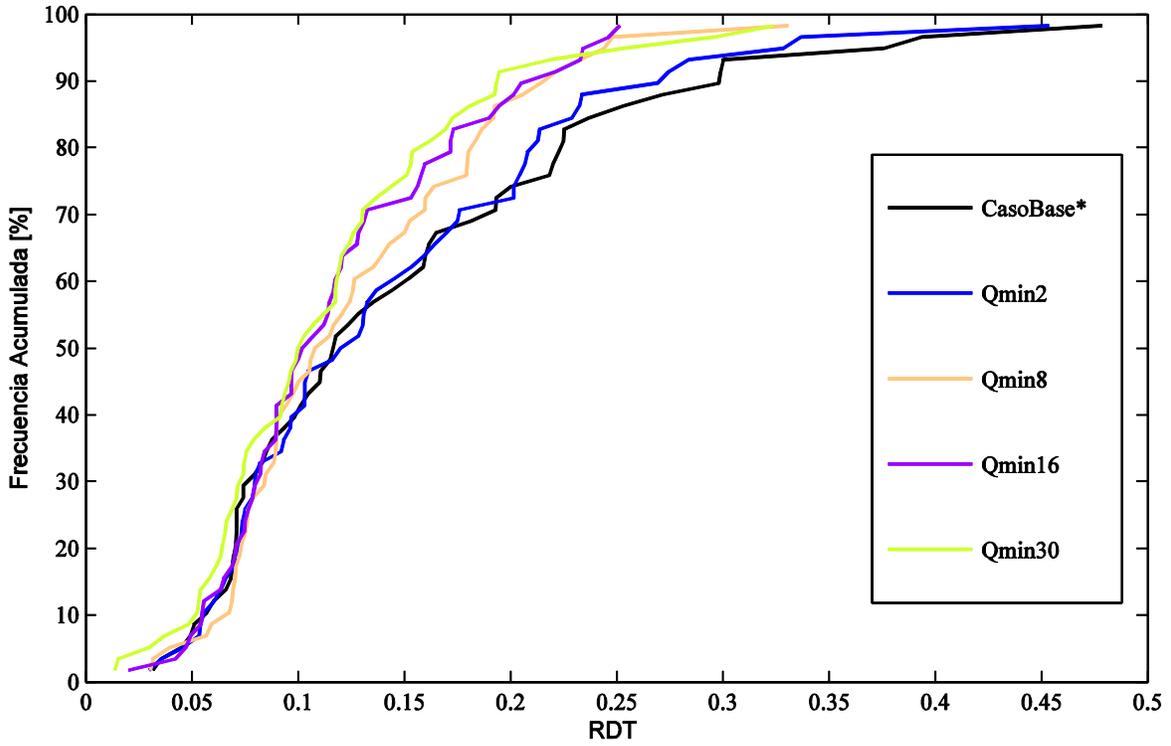


Figura C. II.- Indicador RDT. Restricciones Qmín.

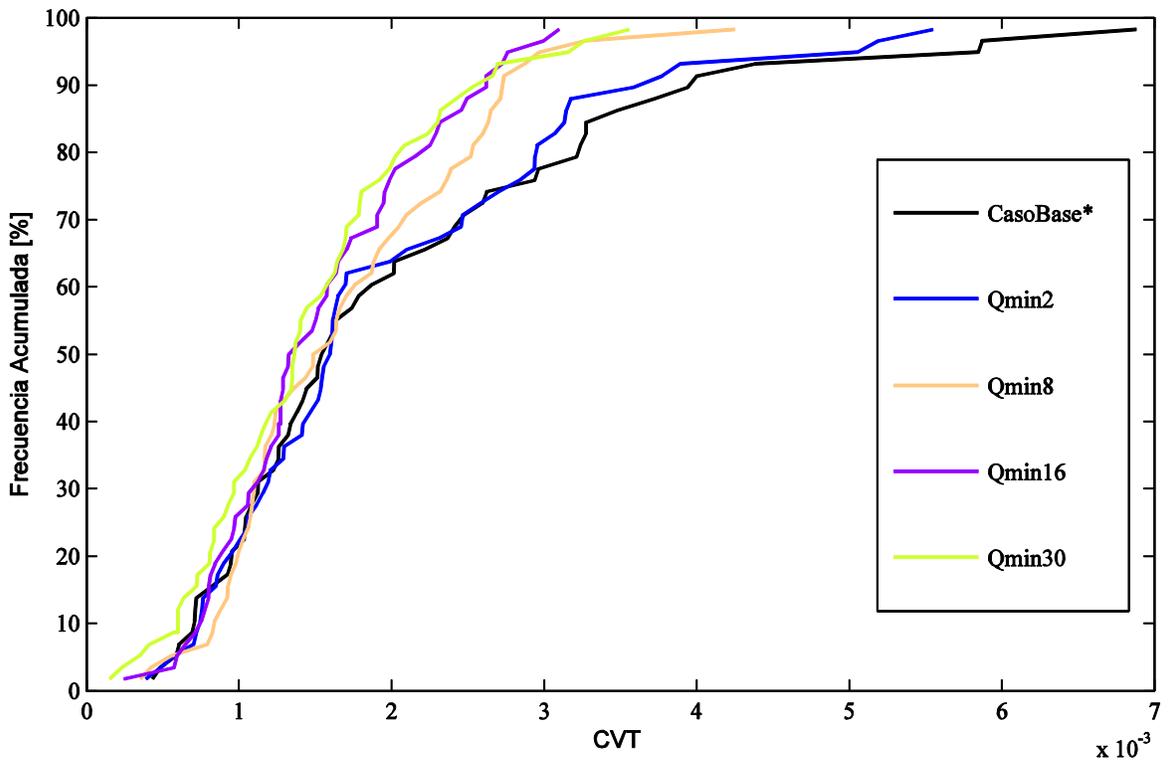


Figura C. III.- Indicador CVT. Restricciones Qmín.

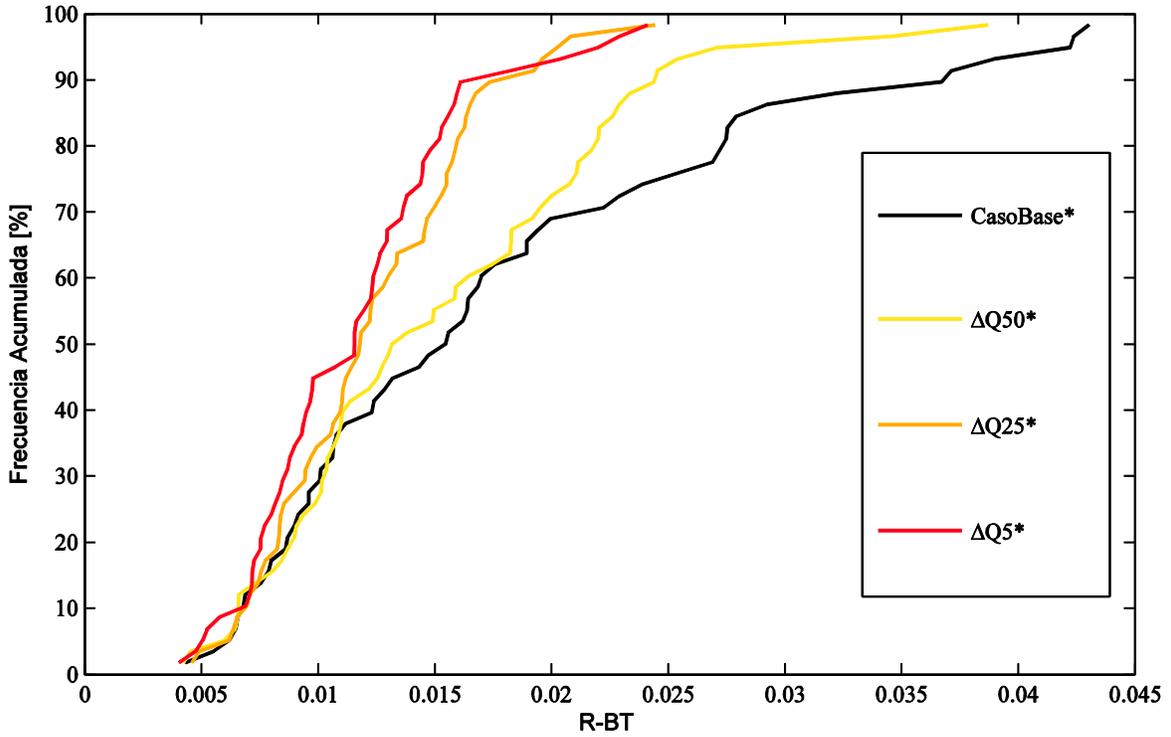


Figura C. IV.- Indicador R-BT. Restricciones  $\Delta Q_{\text{máx}}$ .

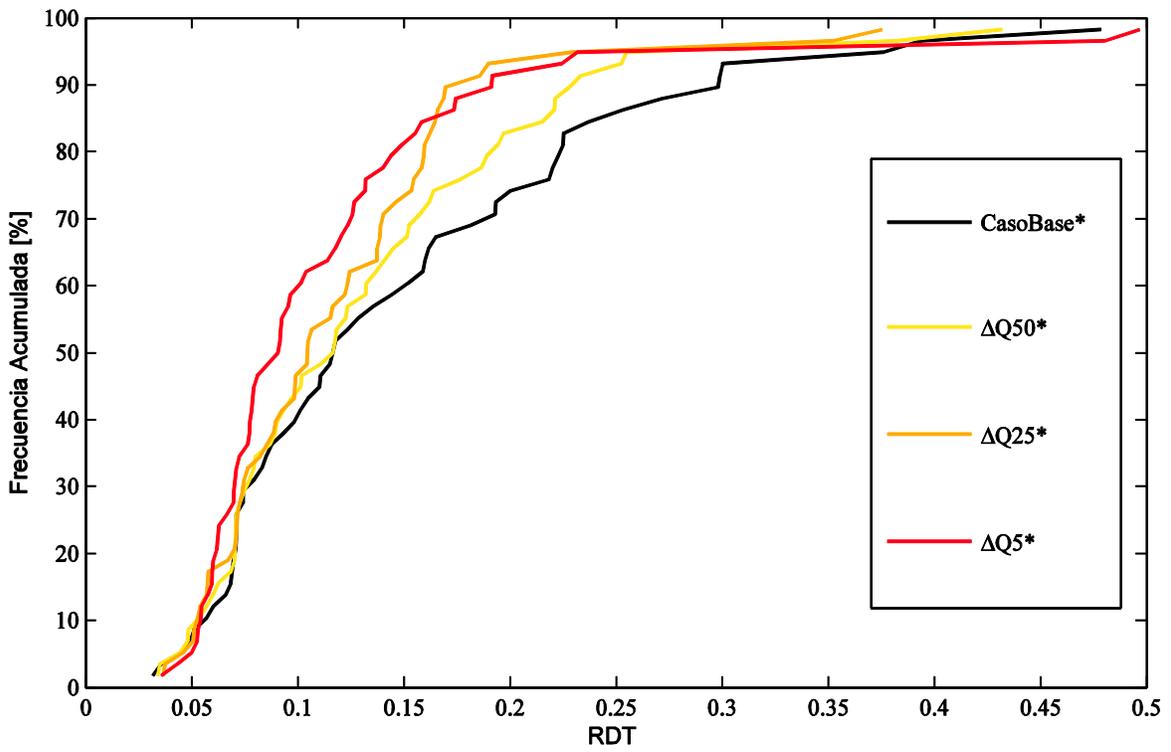


Figura C.V.- Indicador RDT. Restricciones  $\Delta Q_{\text{máx}}$

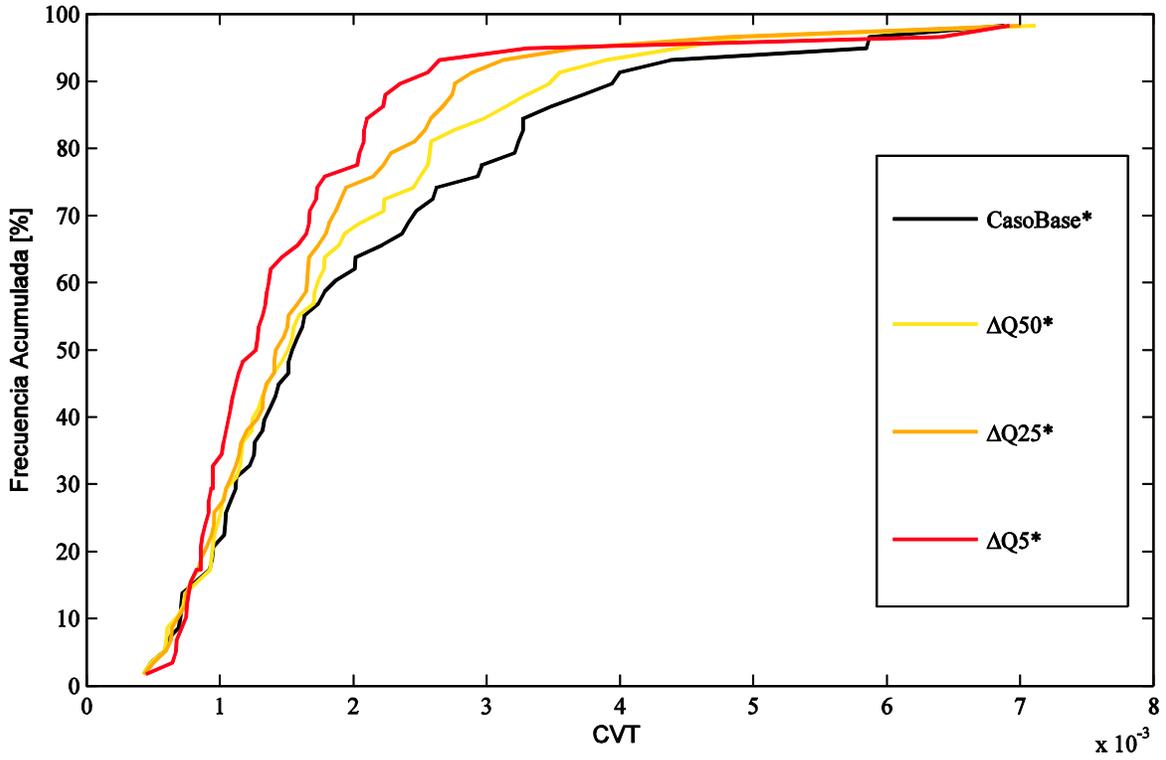


Figura C. VI.- Indicador CVT. Restricciones  $\Delta Q_{máx}$ .

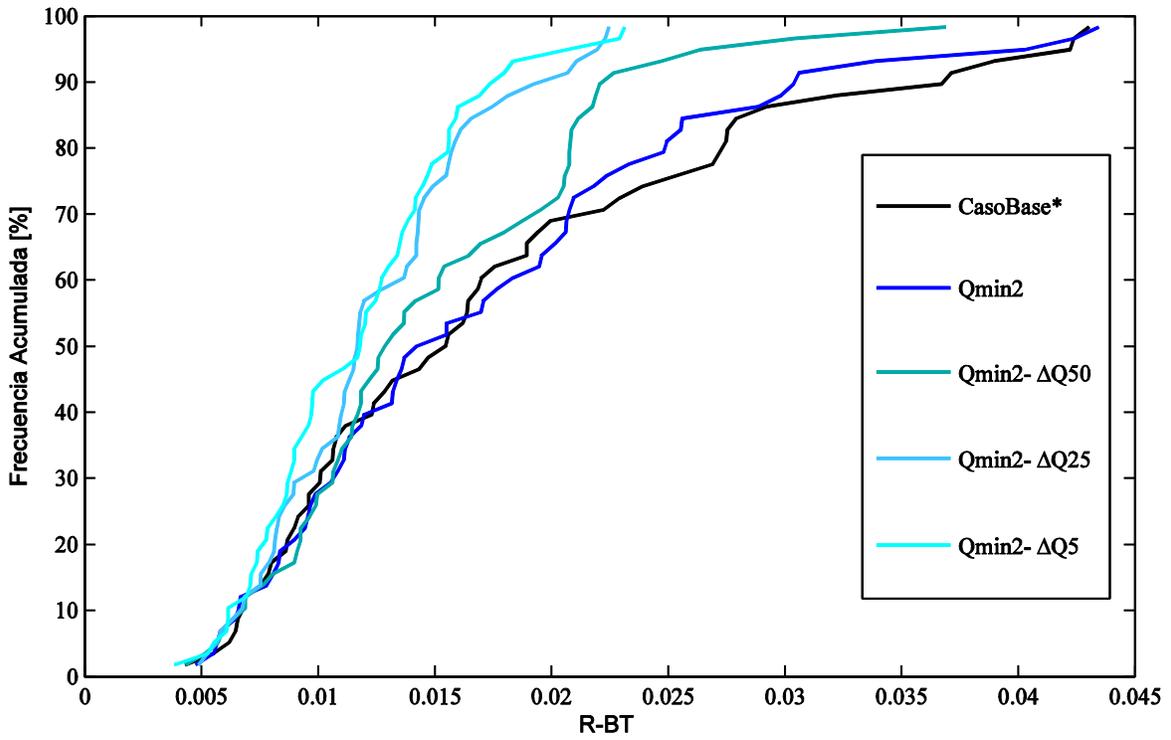


Figura C. VII.- Indicador R-BT. Restricciones  $Q_{mín 2}$  y  $\Delta Q_{máx}$  fluctuante.

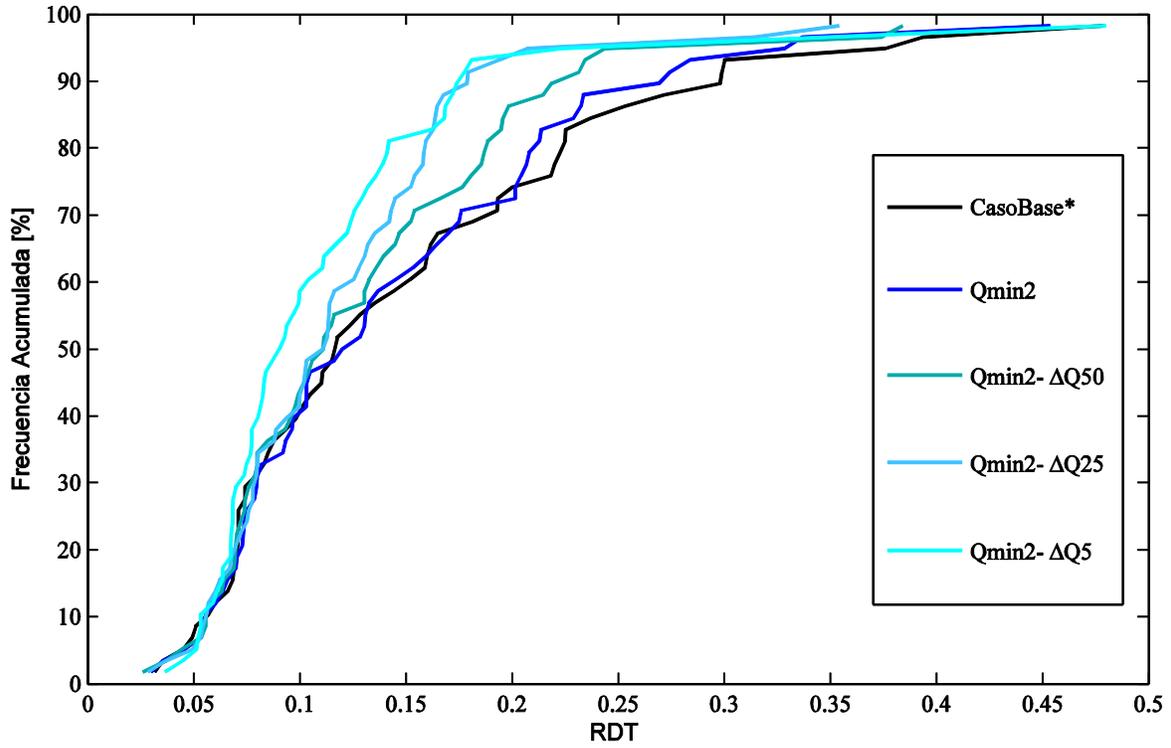


Figura C. VIII.- Indicador RDT. Restricciones  $Q_{\min} 2$  y  $\Delta Q_{\max}$  fluctuante.

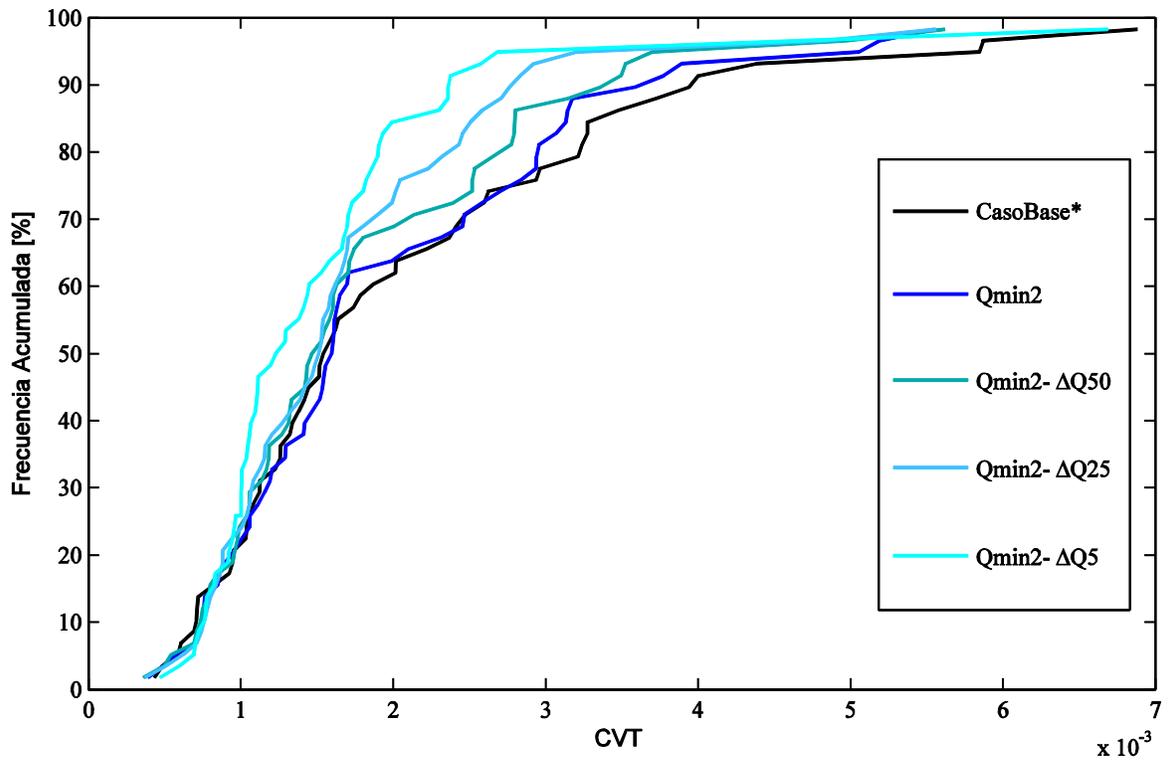


Figura C. IX.- Indicador CVT. Restricciones  $Q_{\min} 2$  y  $\Delta Q_{\max}$  fluctuante.

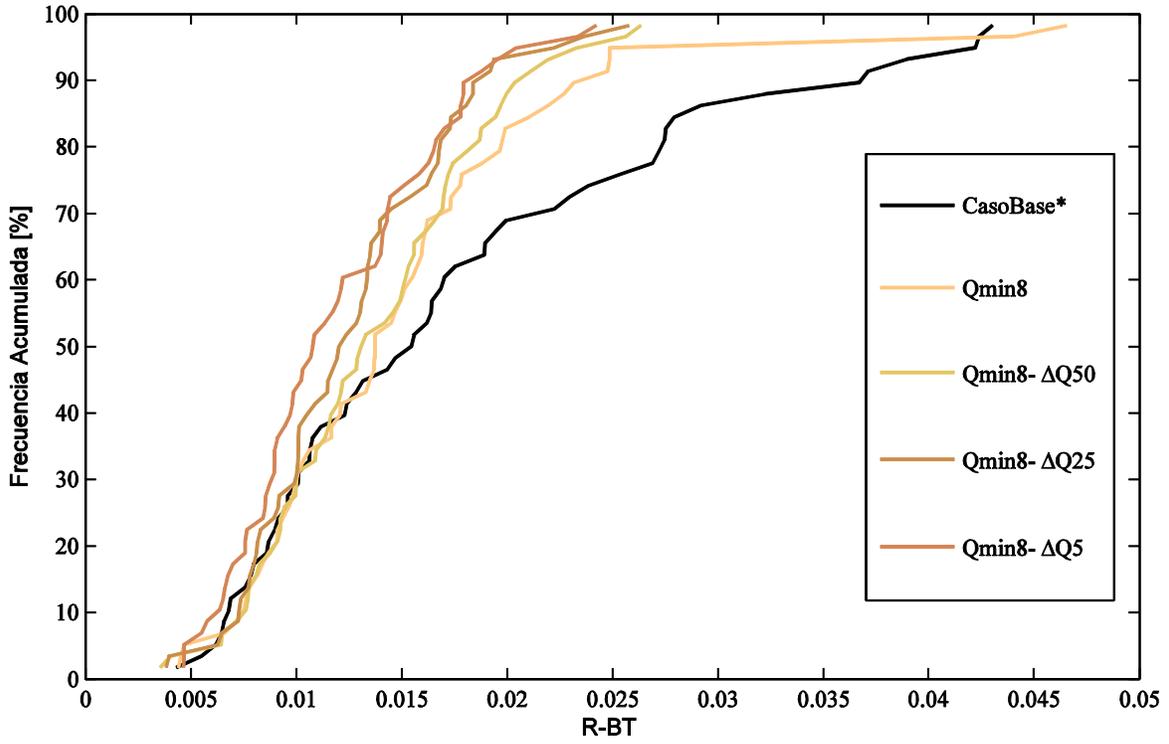


Figura C. X.- Indicador R-BT. Restricciones  $Q_{\min} 8$  y  $\Delta Q_{\max}$  fluctuante.

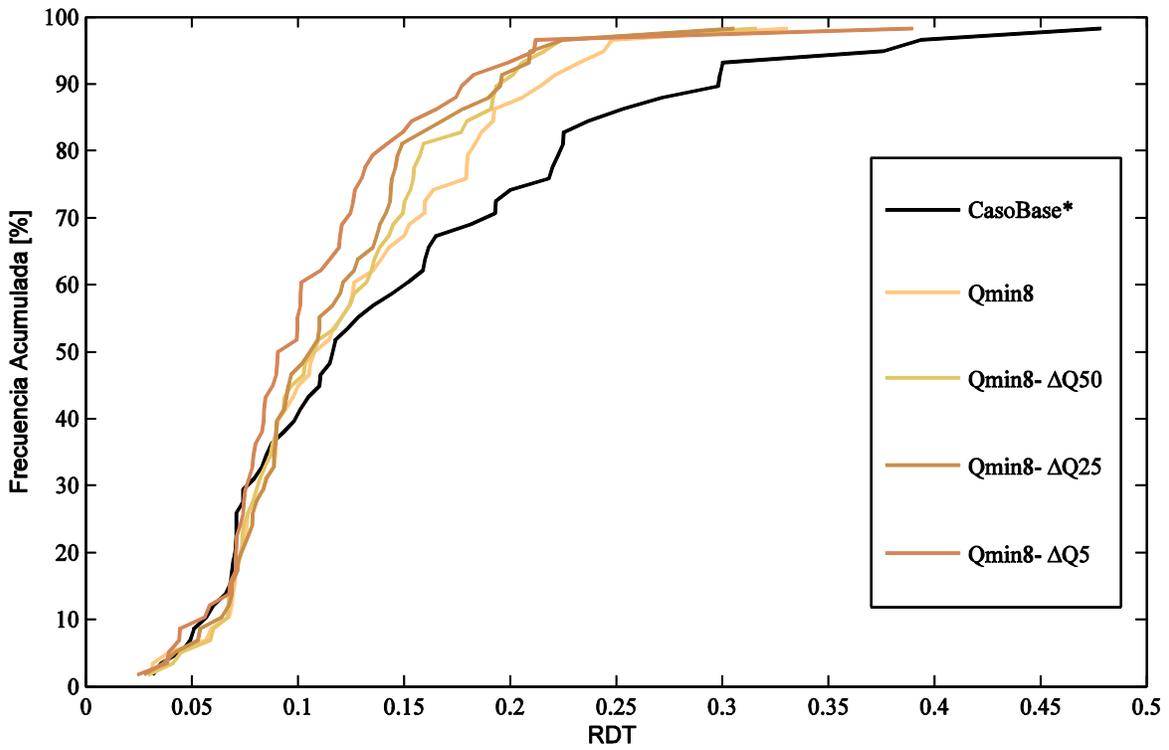


Figura C. XI.- Indicador RDT. Restricciones  $Q_{\min} 8$  y  $\Delta Q_{\max}$  fluctuante.

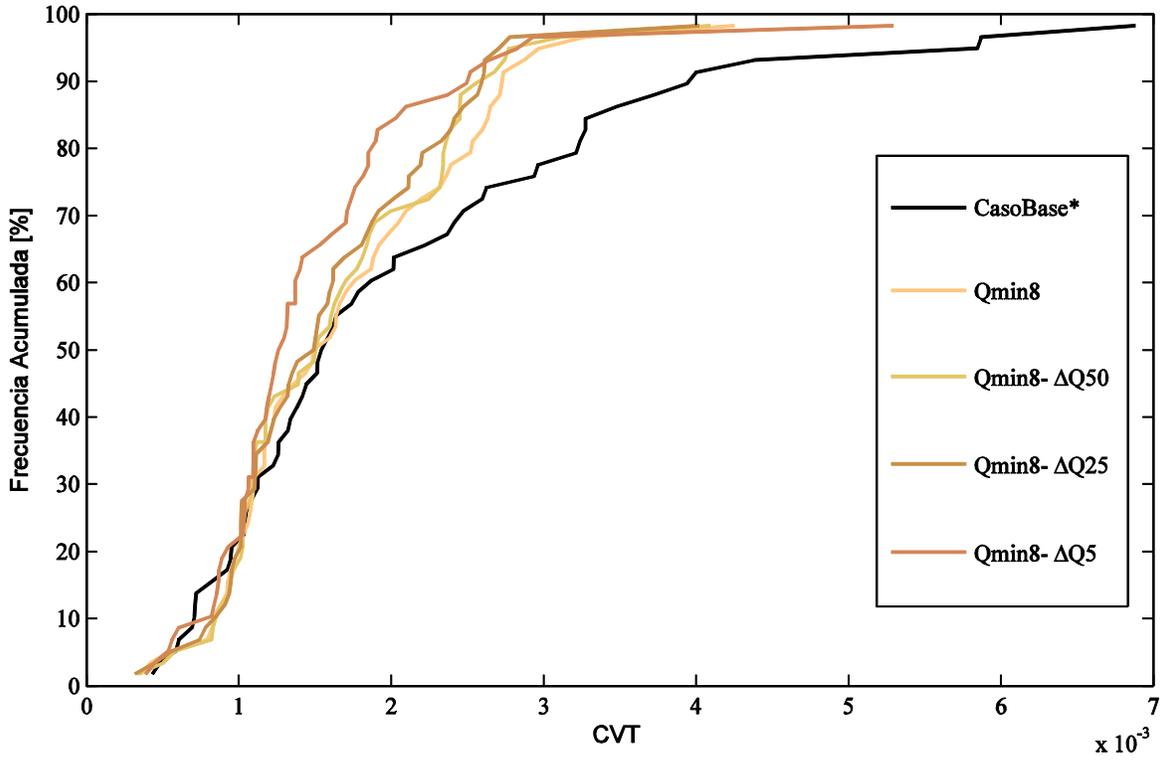


Figura C. XII.- Indicador CVT. Restricciones  $Q_{\min} 8$  y  $\Delta Q_{\max}$  fluctuante.

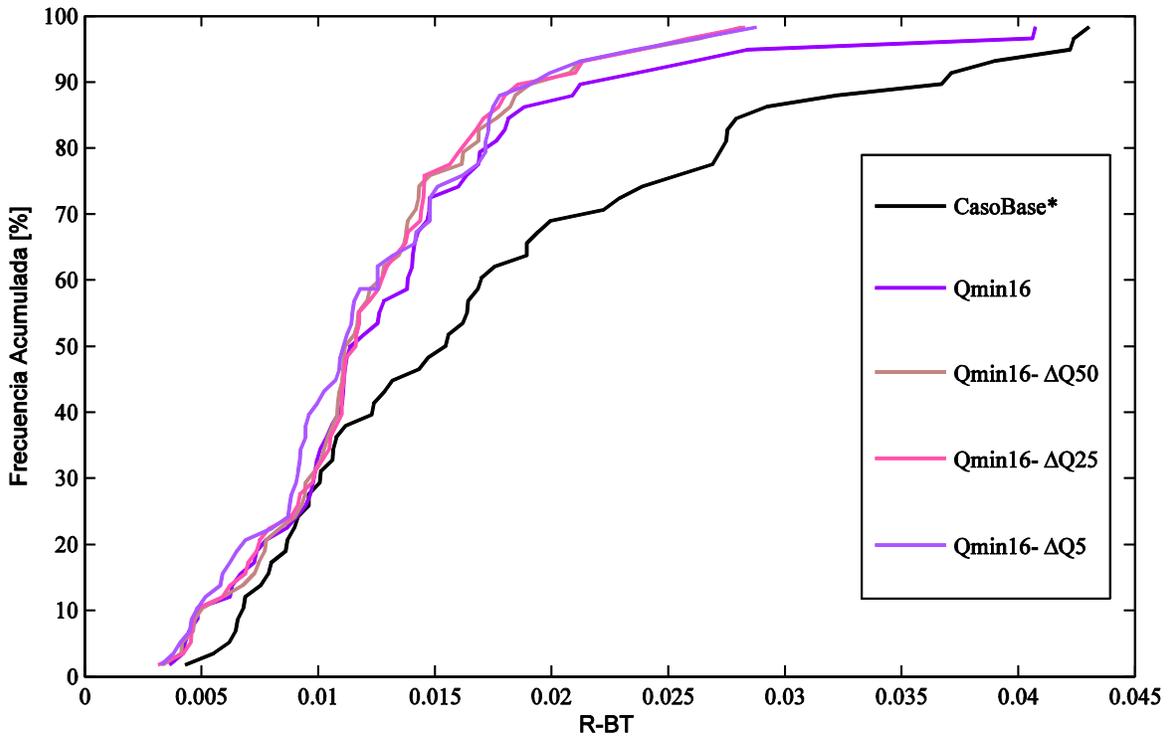


Figura C. XIII.- Indicador R-BT. Restricciones  $Q_{\min} 16$  y  $\Delta Q_{\max}$  fluctuante.

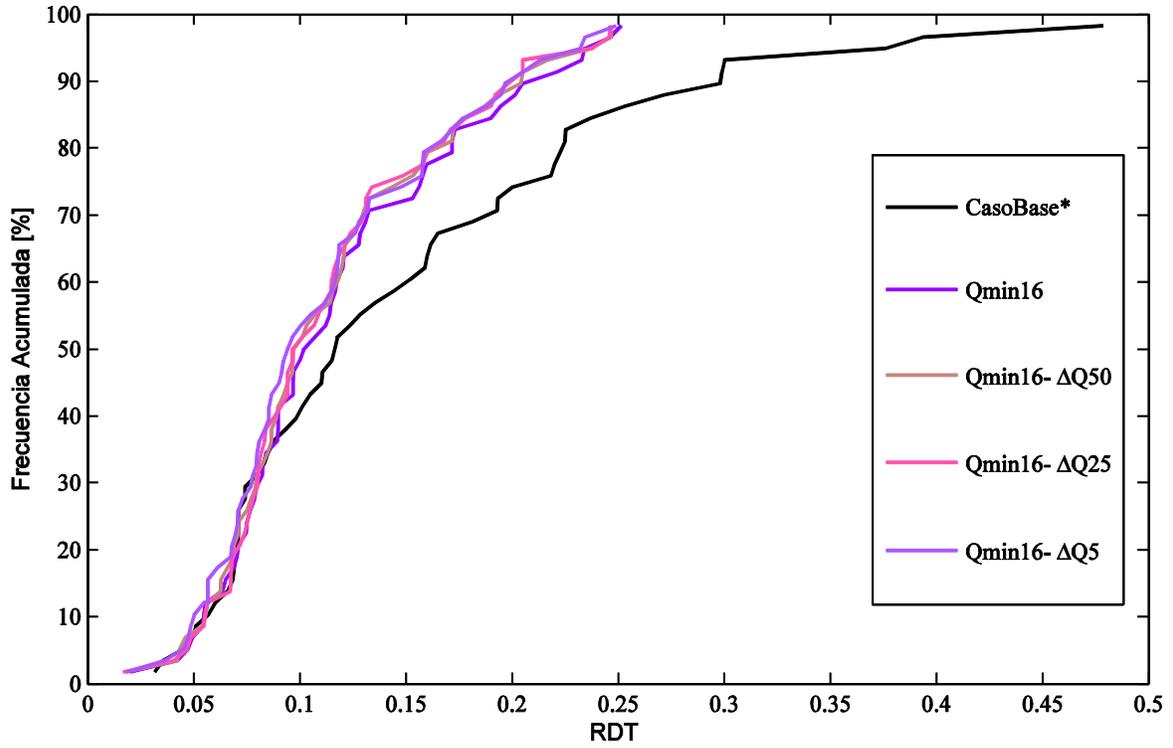


Figura C. XIV.- Indicador RDT. Restricciones  $Q_{\min}$  16 y  $\Delta Q_{\max}$  fluctuante.

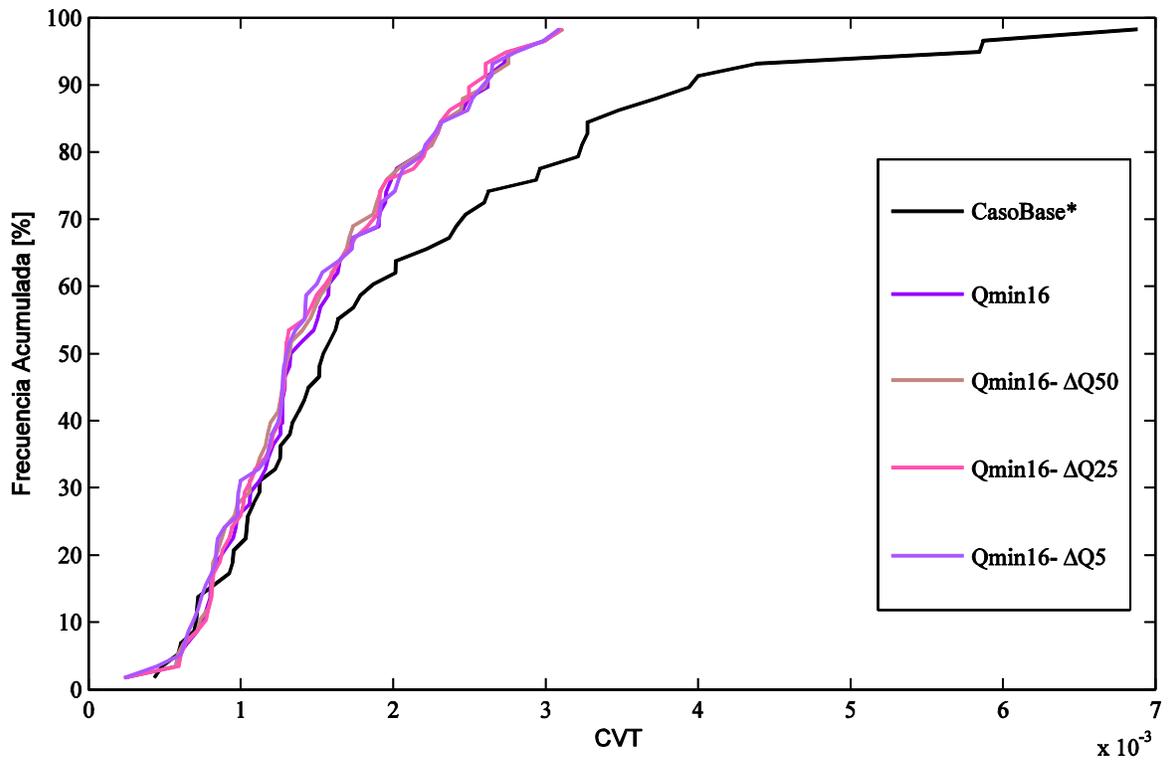


Figura C. XV.- Indicador CVT. Restricciones  $Q_{\min}$  16 y  $\Delta Q_{\max}$  fluctuante.

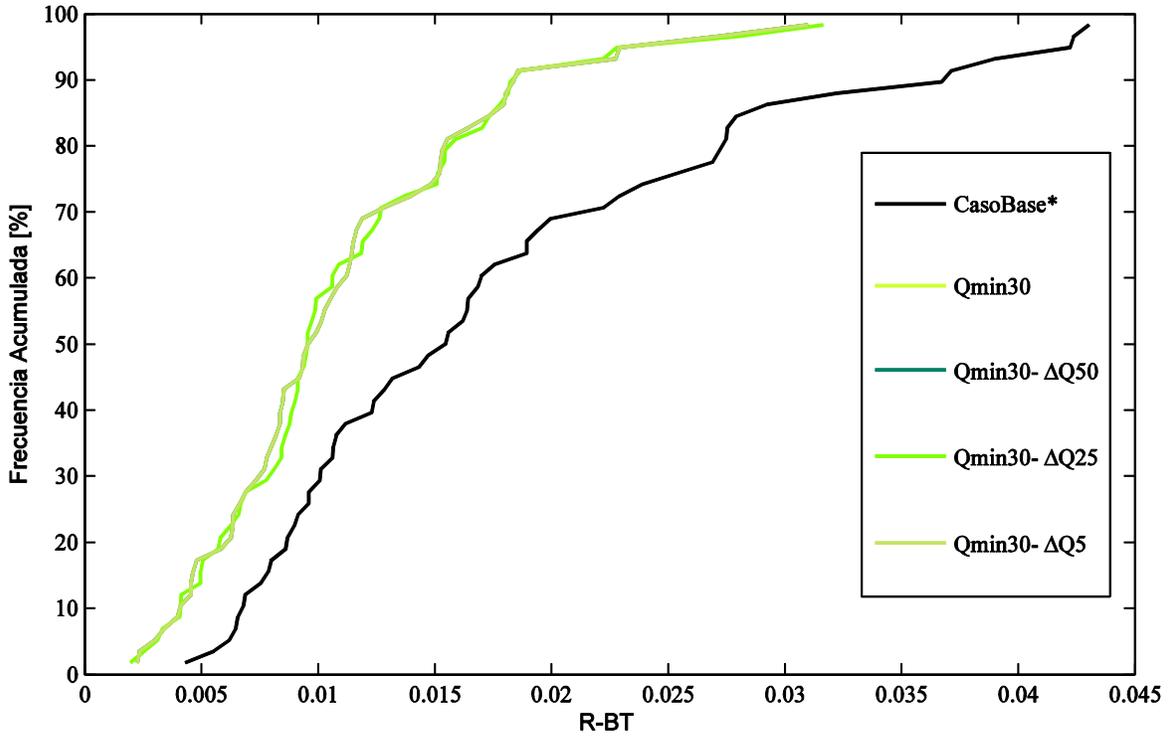


Figura C. XVI.- Indicador R-BT. Restricciones  $Q_{\min}$  30 y  $\Delta Q_{\max}$  fluctuante.

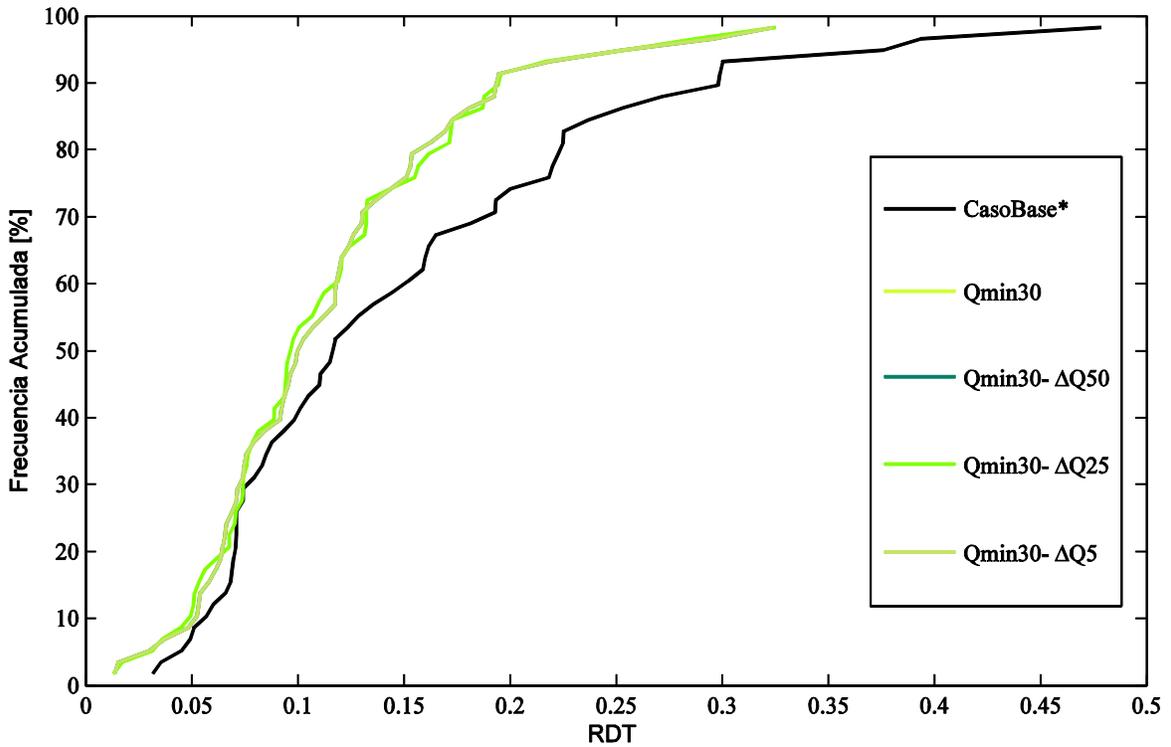


Figura C. XVII.- Indicador RDT. Restricciones  $Q_{\min}$  30 y  $\Delta Q_{\max}$  fluctuante.

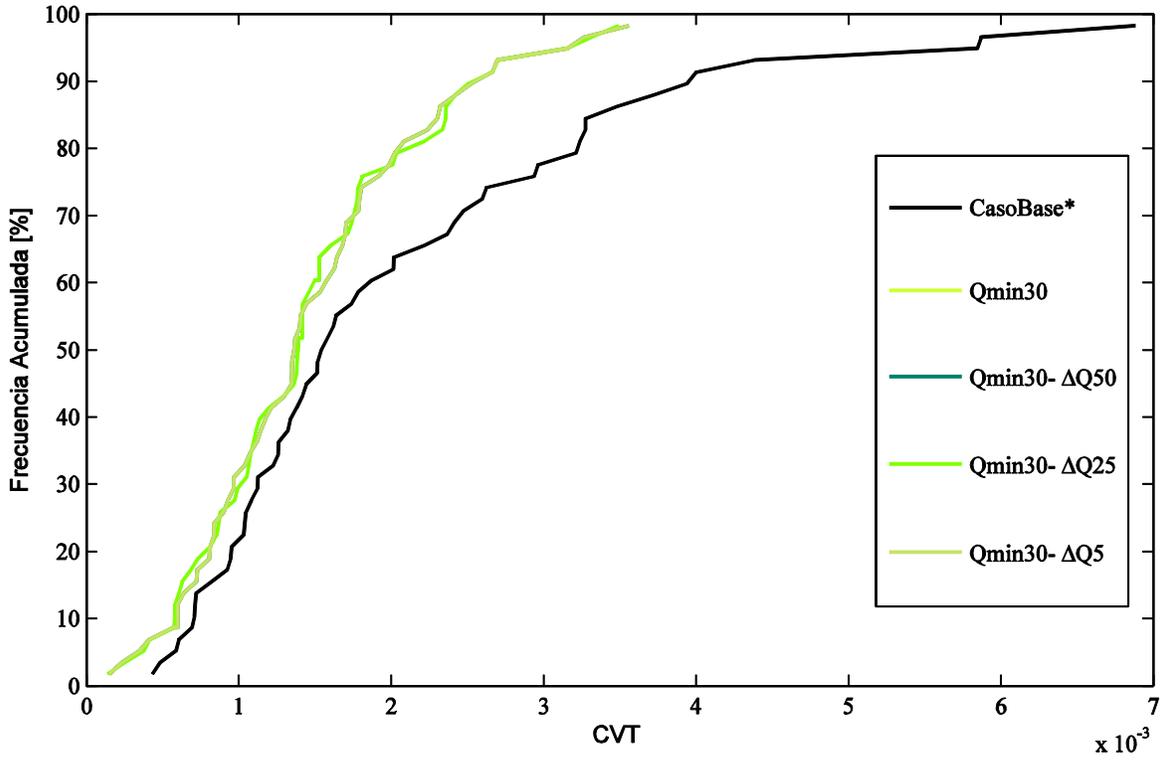


Figura C. XVIII.- Indicador CVT. Restricciones  $Q_{\min}$  30 y  $\Delta Q_{\max}$  fluctuante.

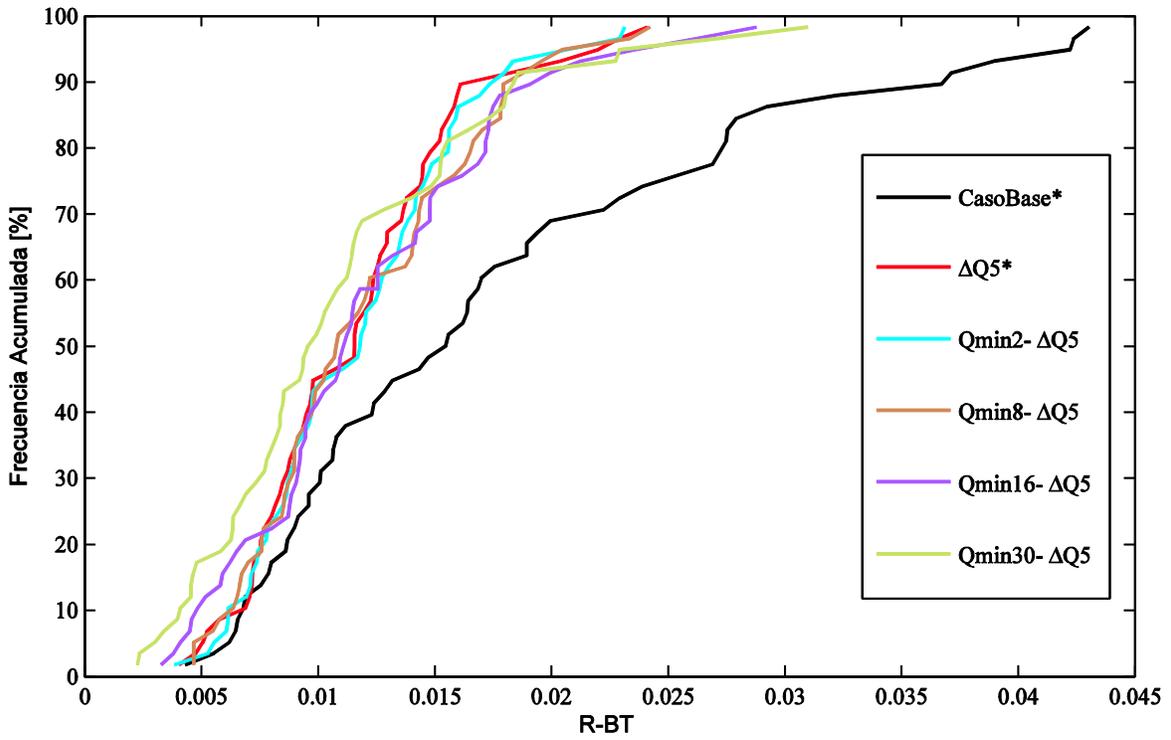


Figura C. XIX.- Indicador R-BT. Restricciones  $Q_{\min}$  fluctuante y  $\Delta Q_{\max}$  5.

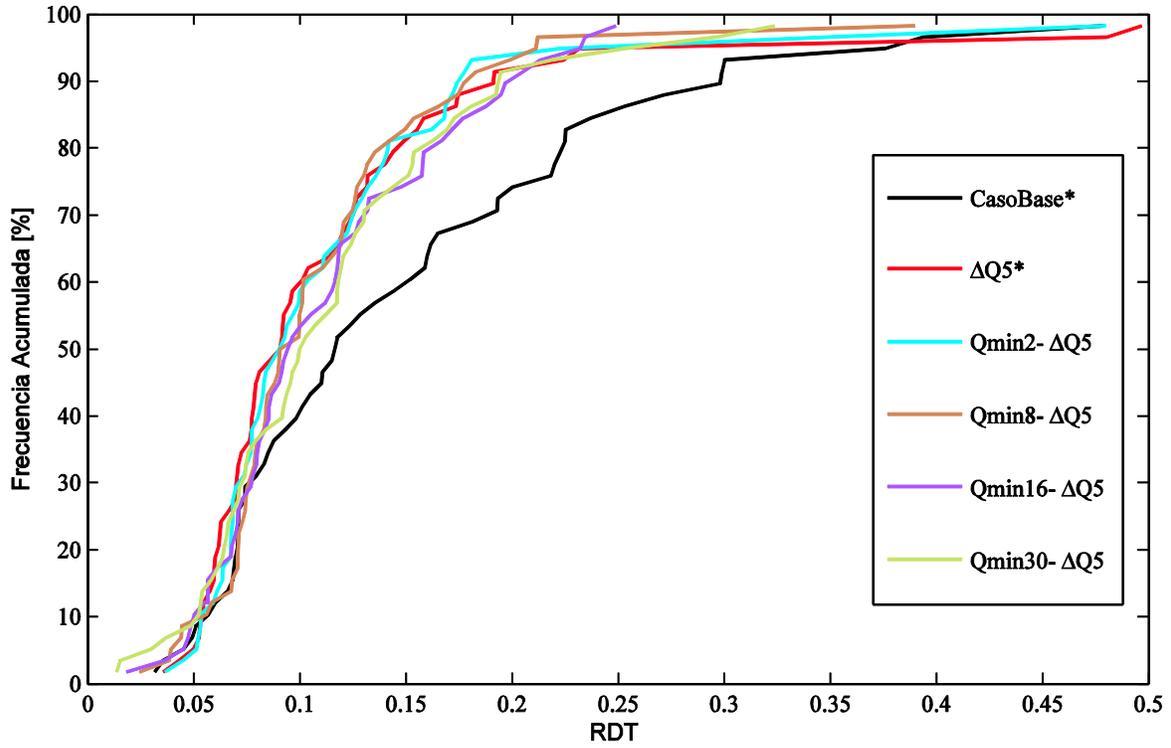


Figura C. XX.- Indicador RDT. Restricciones Q<sub>mín</sub> fluctuante y ΔQ<sub>máx</sub> 5

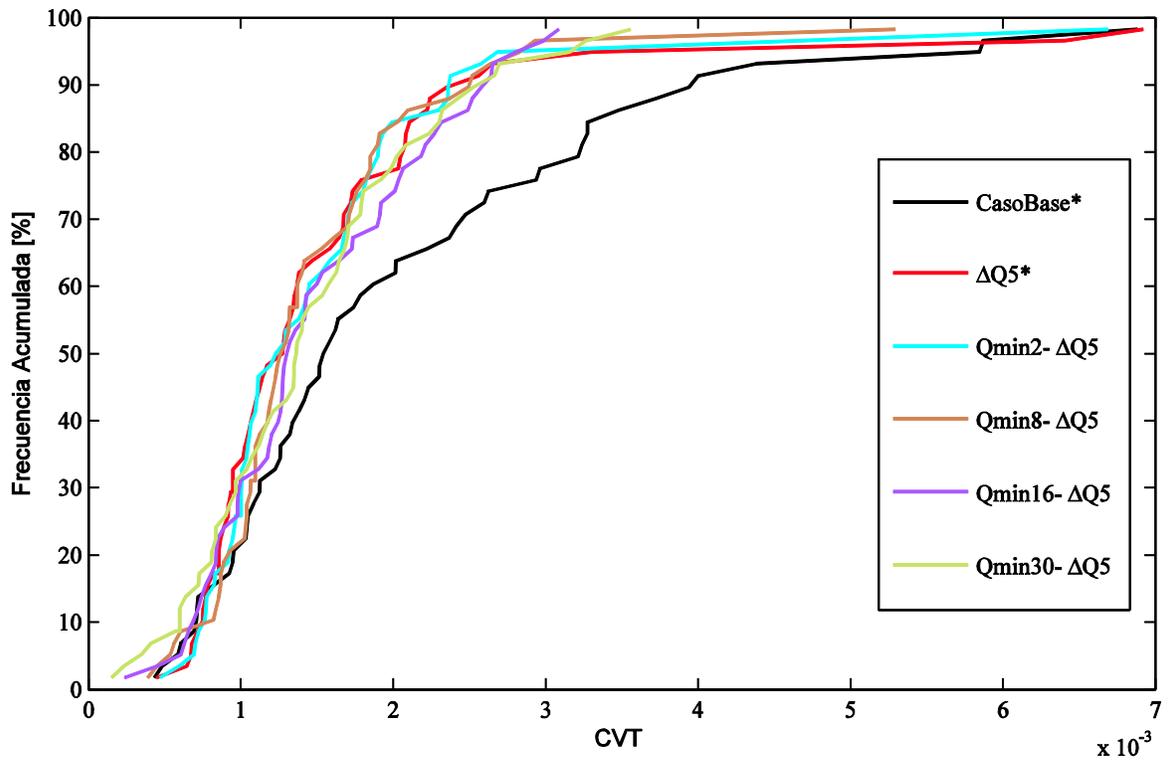


Figura C. XXI.- Indicador CVT. Restricciones Q<sub>mín</sub> fluctuante y ΔQ<sub>máx</sub> 5.

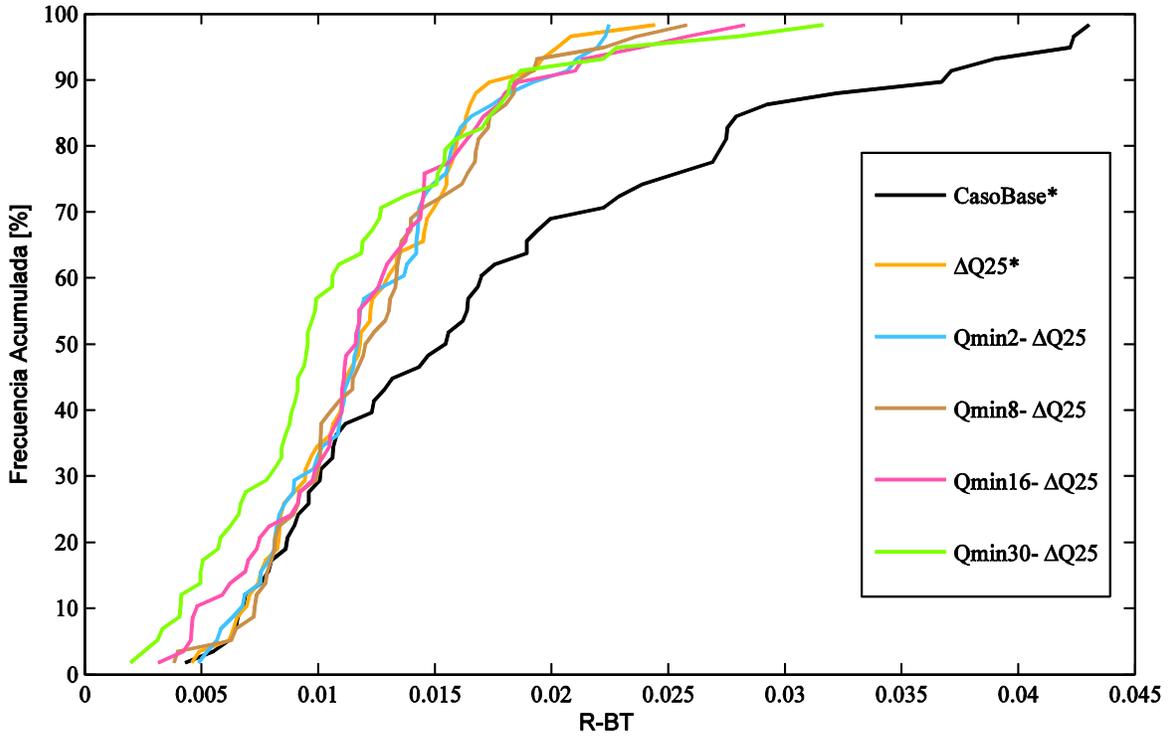


Figura C. XXII.- Indicador R-BT. Restricciones  $Q_{\min}$  fluctuante y  $\Delta Q_{\max}$  25.

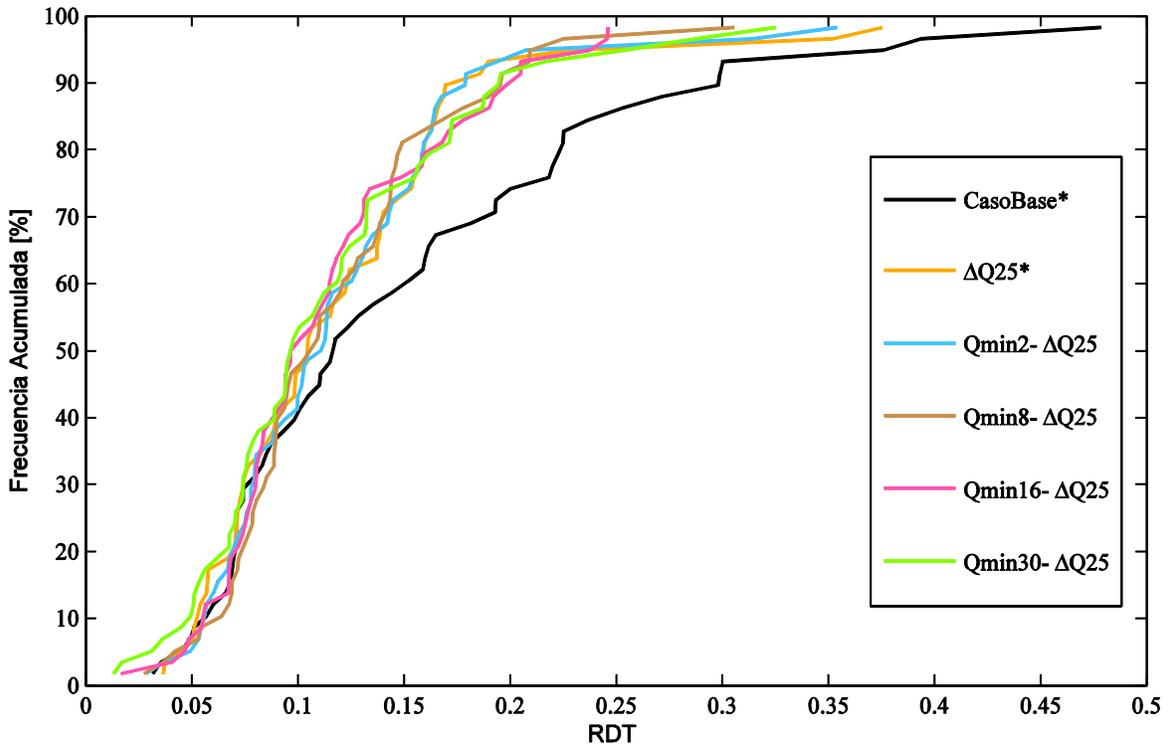


Figura C. XXIII.- Indicador RDT. Restricciones  $Q_{\min}$  fluctuante y  $\Delta Q_{\max}$  25.

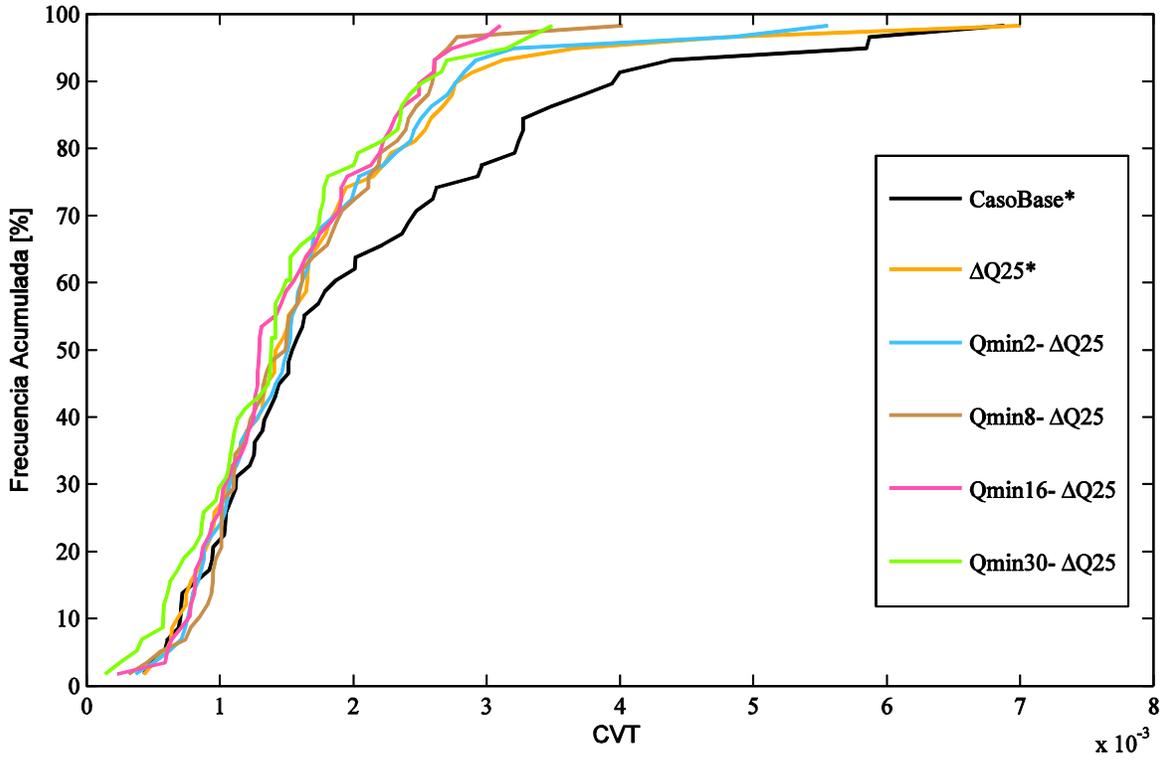


Figura C. XXIV.- Indicador CVT. Restricciones  $Q_{\min}$  fluctuante y  $\Delta Q_{\max}$  25.

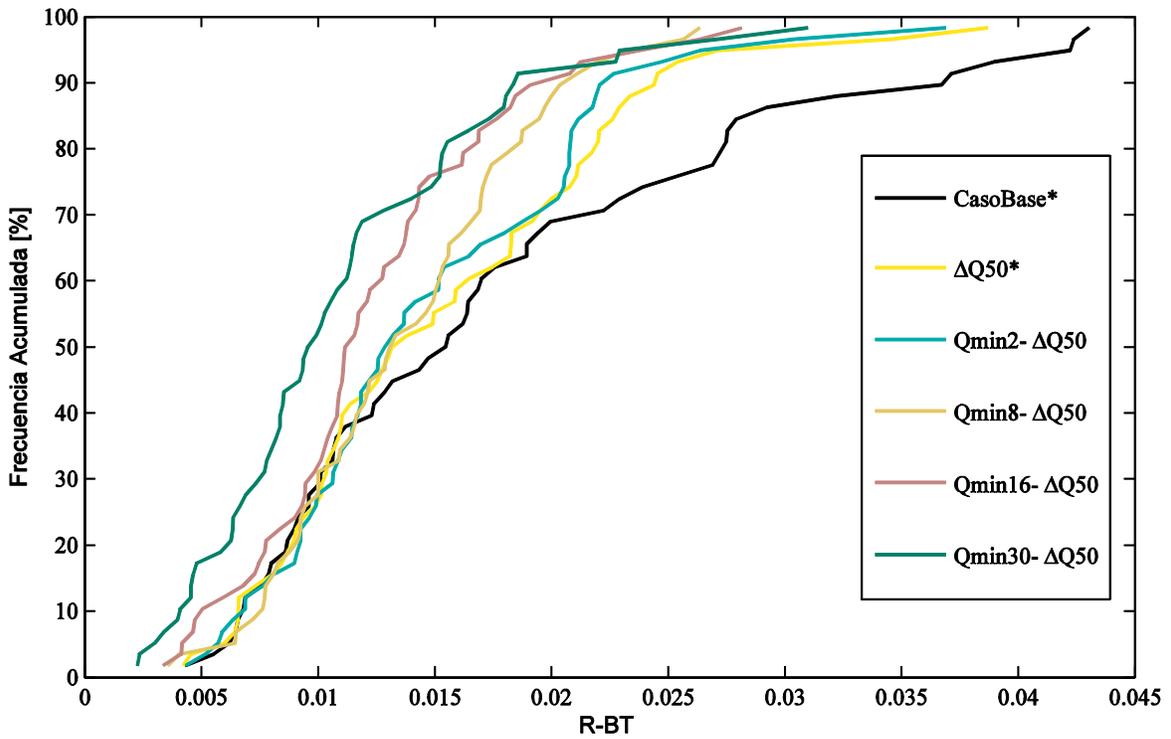


Figura C. XXV.-Indicador R-BT. Restricciones  $Q_{\min}$  fluctuante y  $\Delta Q_{\max}$  50.

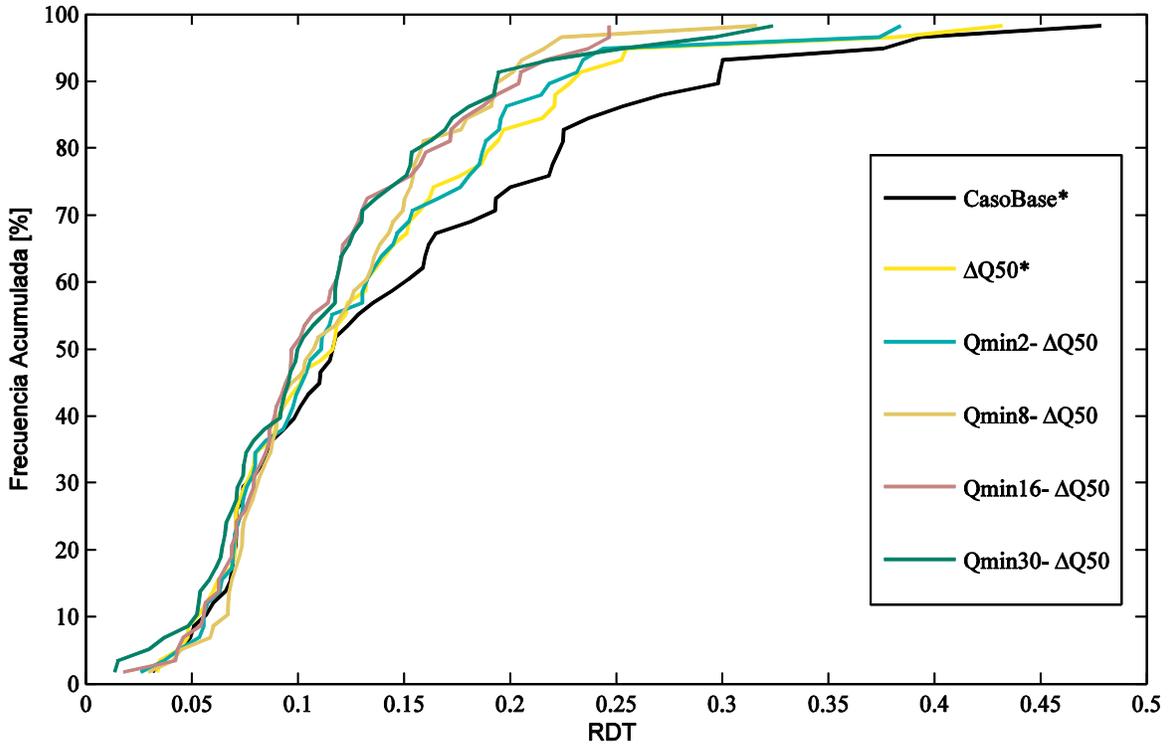


Figura C. XXVI.- Indicador RDT. Restricciones  $Q_{\min}$  fluctuante y  $\Delta Q_{\max}$  50.

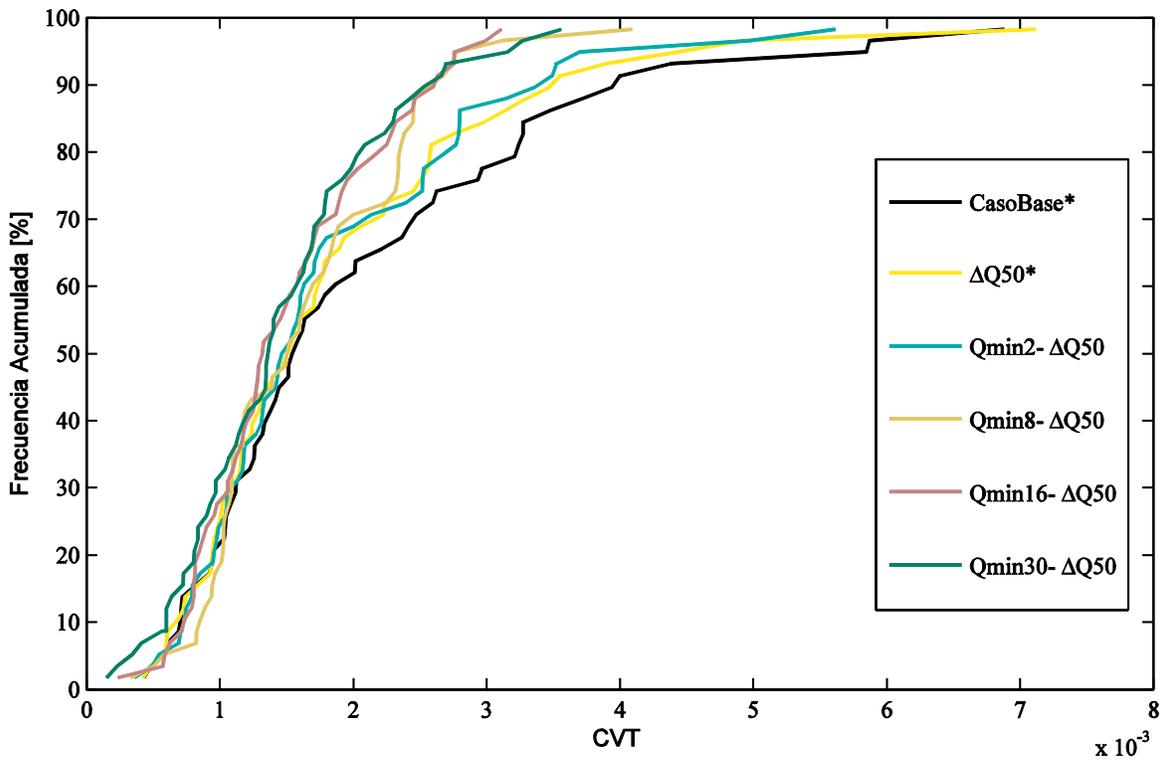


Figura C. XXVII.- Indicador CVT. Restricciones  $Q_{\min}$  fluctuante y  $\Delta Q_{\max}$  50.

## ANEXO D: ANÁLISIS MULTI OBJETIVO

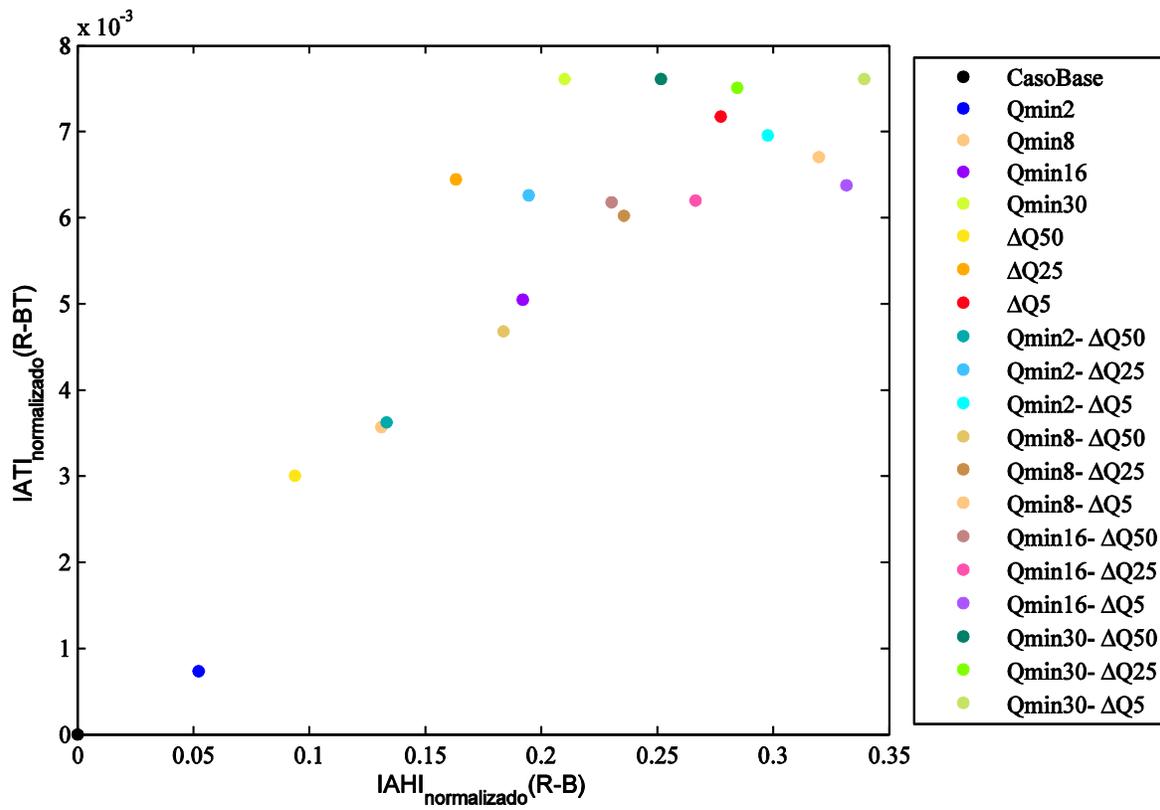


Figura D. I.- Análisis multiobjetivo R-BT y R-B.

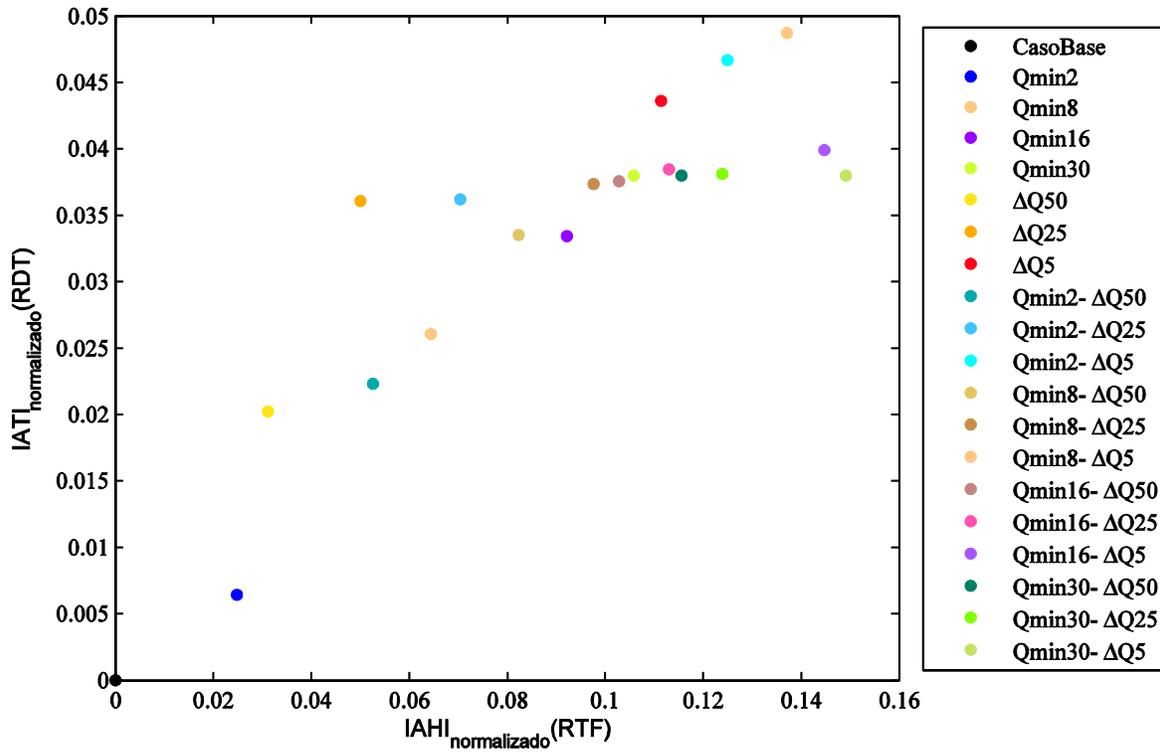


Figura D. II.- Análisis multiobjetivo RDT y RTF.

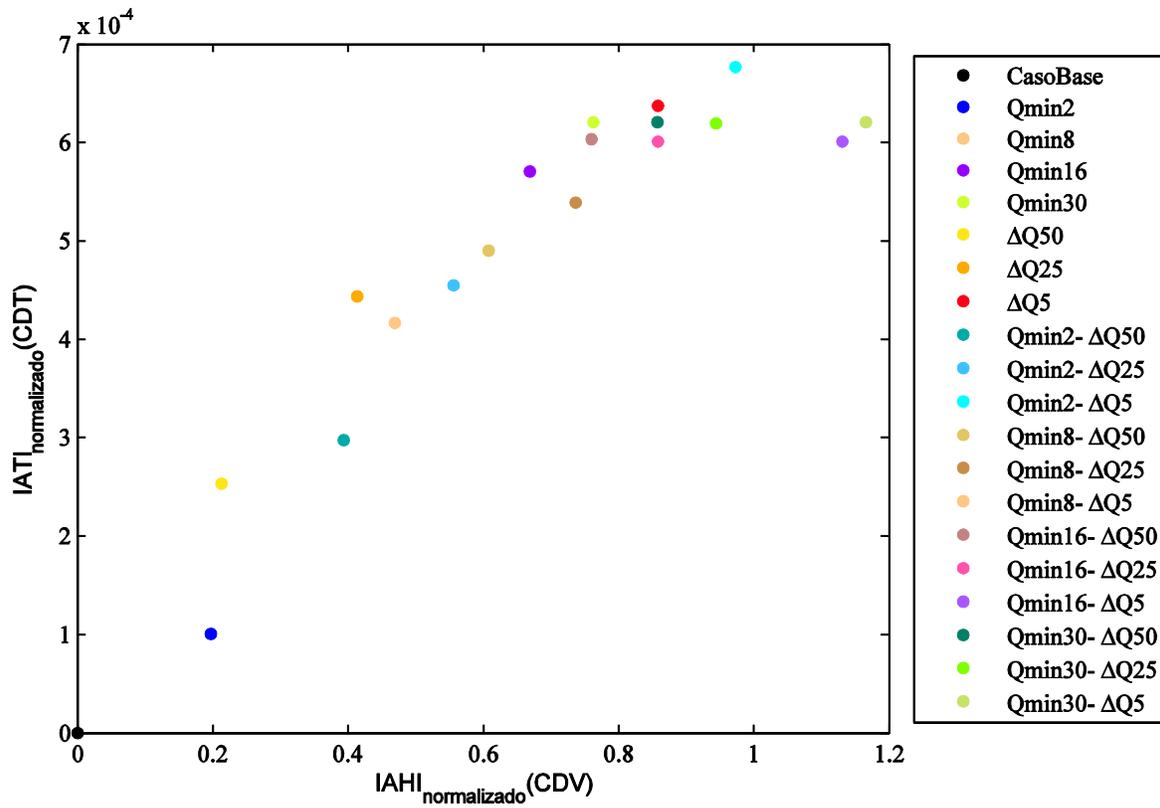


Figura D. III.- Análisis multiobjetivo CDT y CDV.