
Aplicación de la metodología de estimación de caudal ambiental propuesta por el MADS, en el Sector Eléctrico Colombiano.

Abril de 2018



Guía para la Estimación de Caudal Ambiental

- Metodología propuesta por el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible en el año 2017, con el objetivo de preservar las condiciones naturales del afluente intervenido, para esto:

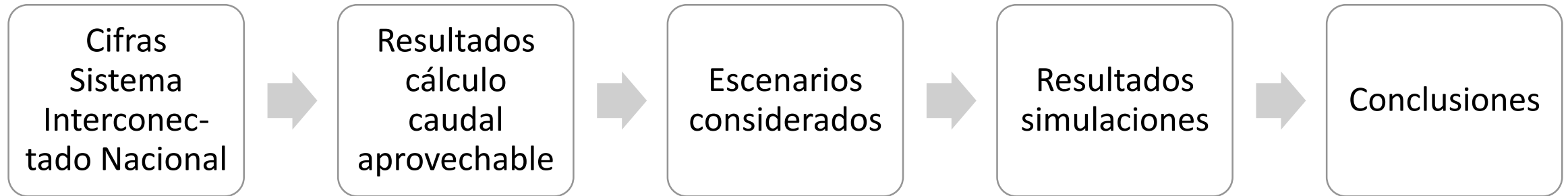
Componente hidrológico

- Restricción de máxima captación sobre el afluente (Aprovechamiento máximo).
 - Limitación de las descargas por turbinamientos de las centrales hidroeléctricas.
- El MADS ha solicitado, a través de la UPME, que el Sector Eléctrico presente los impactos de la aplicación de esta guía.

Objetivo

- Presentar el impacto de la aplicación de la guía metodológica para la estimación del caudal ambiental sobre la operación del Sistema Interconectado Nacional.

Contenido



Sistema Interconectado Nacional

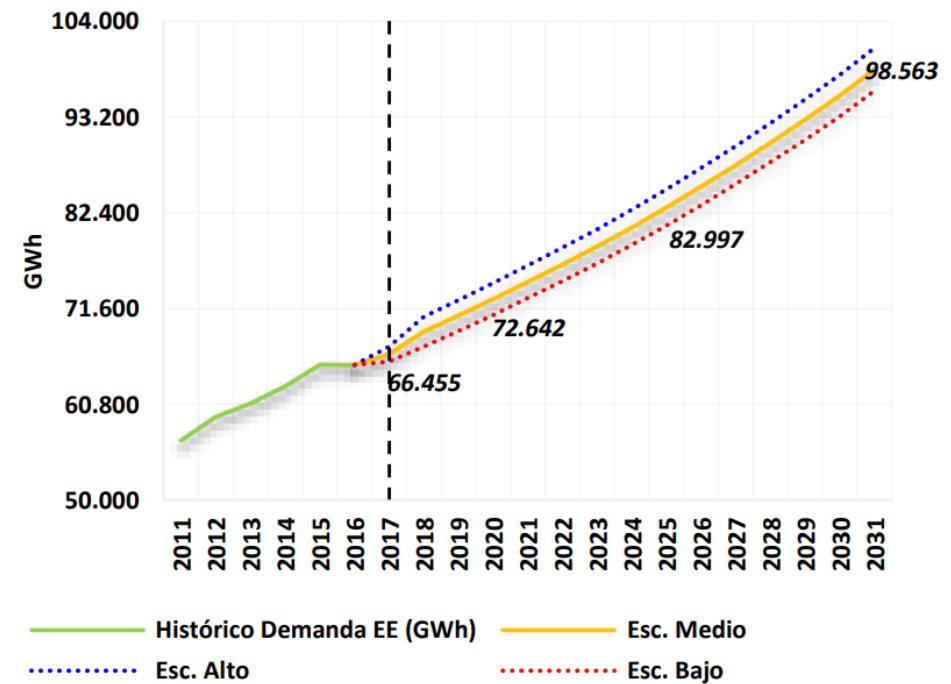
Capacidad Efectiva Neta (MW)

Recursos	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Hidráulicos	9,185	9,315	10,315	10,892	10,963	10,943
Térmicos	4,426	4,515	4,402	4,743	4,728	4,729
Menores	674	644	677	680	753	920.13
Cogeneradores	57	66	77	86	99	122
Autogeneradores					32	36
Eólica	18	18	18	18	18	18
Solar						10
Total	14,361	14,558	15,489	16,420	16,594	16,778

Generación de energía (GWh)

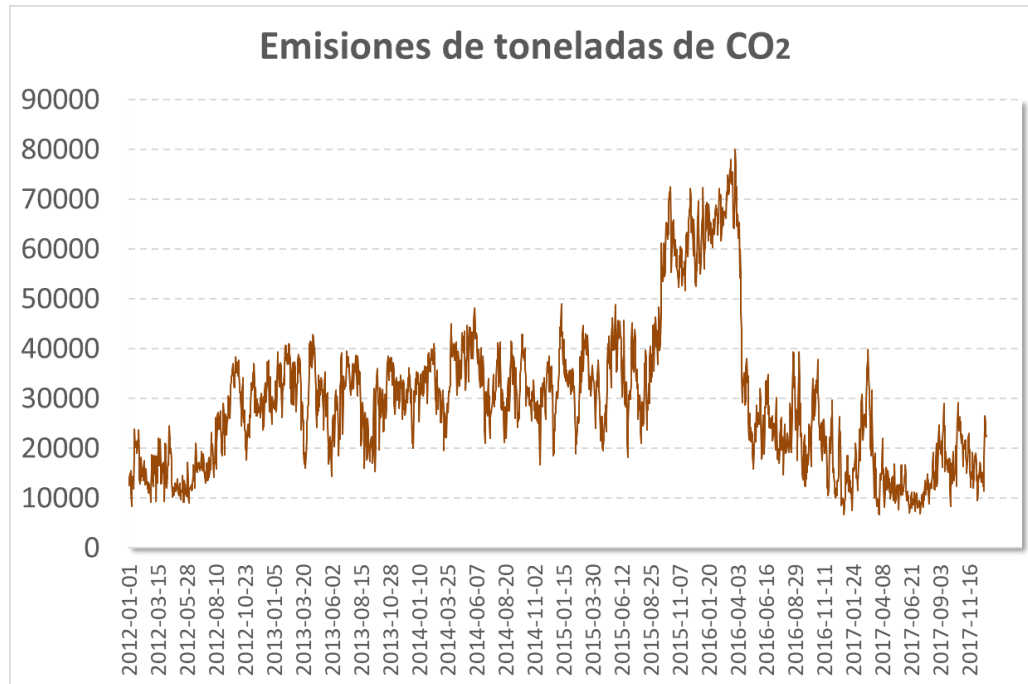
Recursos	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Hidráulicos	44,923	41,835	42,157	42,463	44,246	53,568
Térmicos	11,506	16,839	18,406	20,631	17,790	7,941
Menores	3,158	3,112	3,222	2,859	3,142	4,421
Cogeneradores	346	351	472	526	600	649
Autogeneradores					111	109
Eólica	55	58	70	68	51	3
Solar						5
Total	59,989	62,197	64,328	66,548	65,940	66,681

Proyecciones crecimiento demanda de energía eléctrica

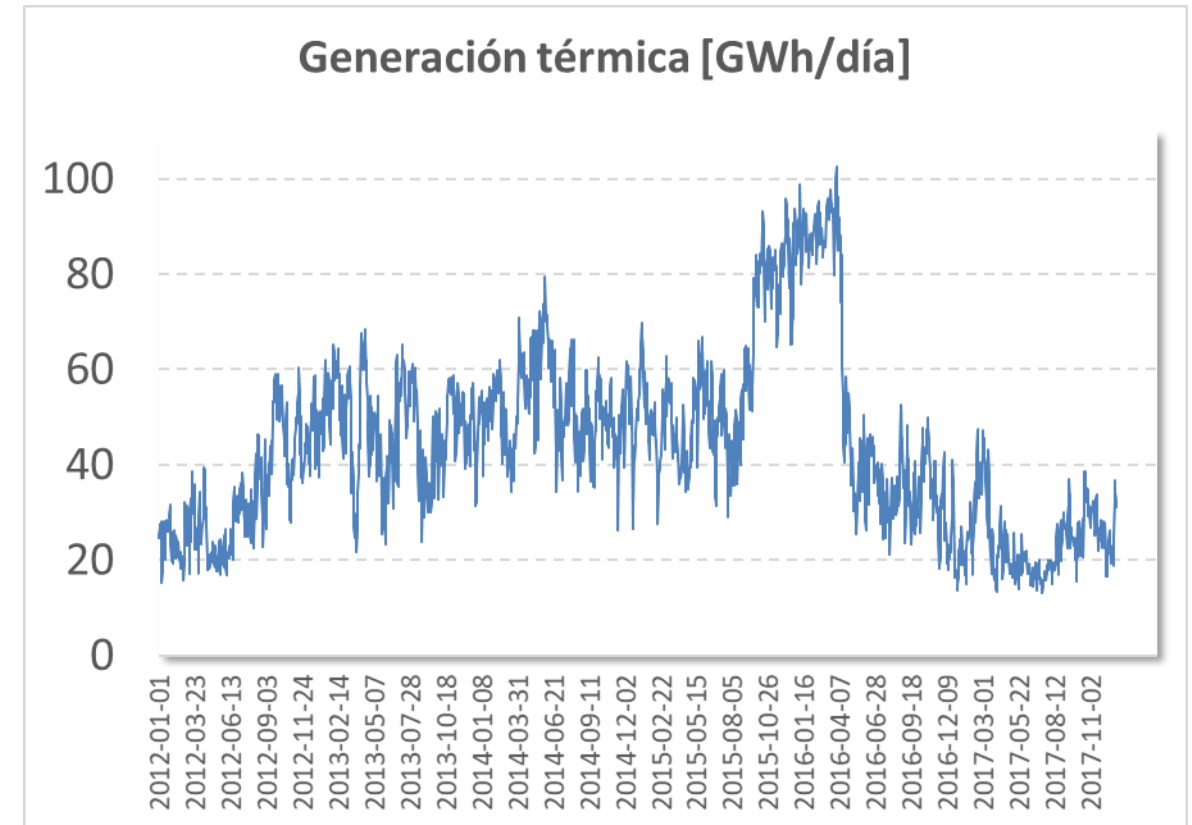


Fuente: UPME

Sistema Interconectado Nacional



Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Millones de Toneladas de CO ₂	7,498	11,121	12,103	15,301	13,103	5,725



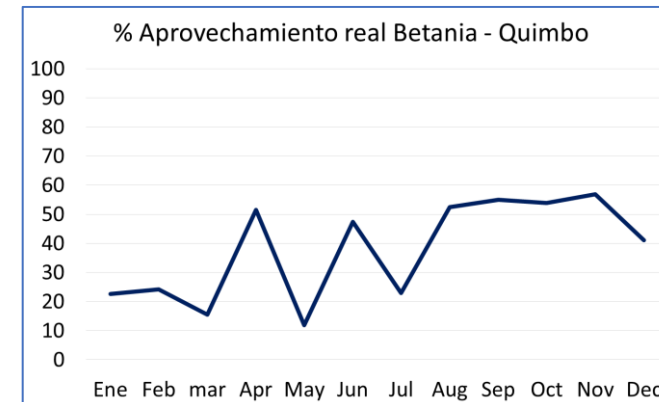
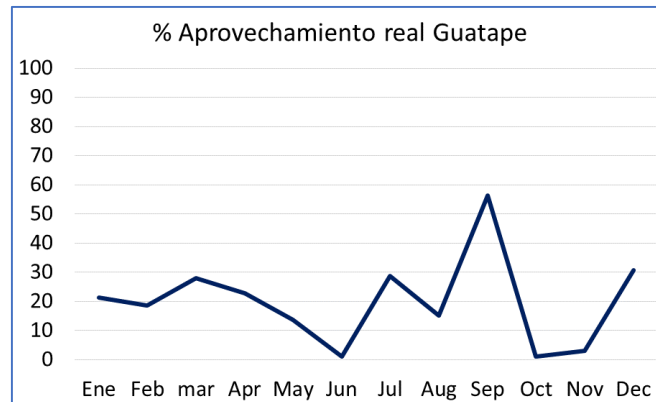
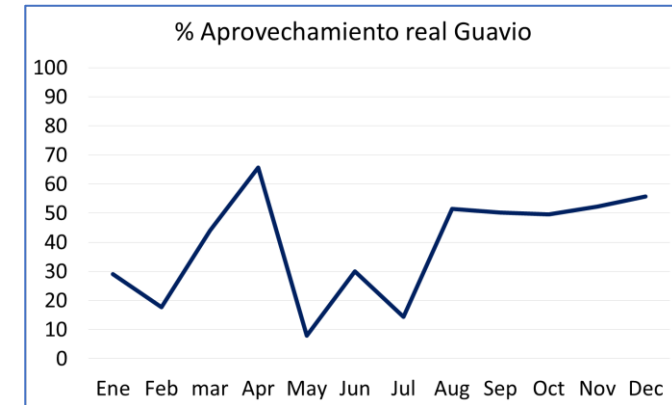
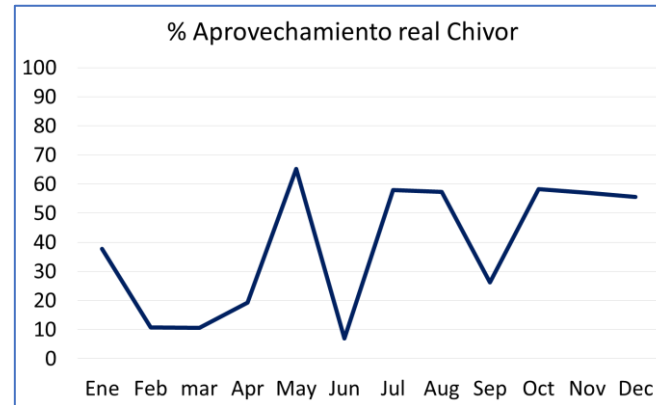
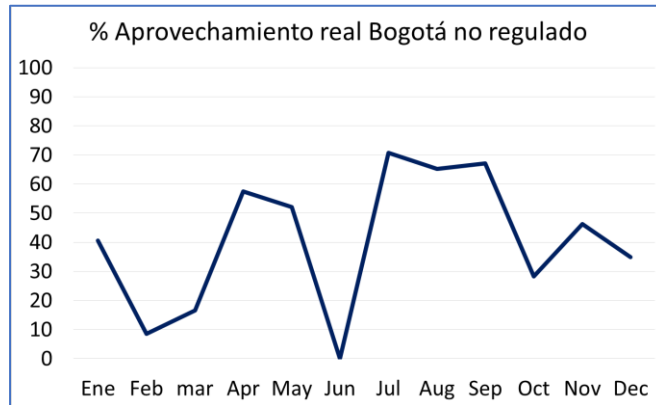
Supuestos - Aplicación de la Guía

Consideraciones para el cálculo de Aprovechamientos

- Se utilizan series de caudales disponibles en resolución diaria.
- Se supuso que todas las series de caudales analizadas presentan una buena correlación con el ONI, separando de esta manera los caudales para condiciones seca, normal y húmeda.
- Para la métrica de interés ecológico que garantiza conectividad lateral (QB) se consideran como sensibilidad caudales máximos de periodo de retorno de 2.33 y 5 años.
- Para la métrica de interés ecológico que garantiza conectividad longitudinal (Qt-q) se consideran como sensibilidad caudales mínimos de períodos de retorno de 2 y 5 años.
- Se utiliza la prueba F (Fisher) para determinar si las muestras de los eventos poseen varianzas iguales o diferentes.
- Se utiliza la prueba t (t student) tanto para varianzas iguales como para varianzas distintas según sea el caso.
- Se aplican las pruebas estadísticas (F, t student) a nivel mensual así se tengan pocos datos y los resultados presenten gran incertidumbre.
- El nivel de significancia usado para aplicar las pruebas estadísticas (F, t student) es del 0.05.
- Los porcentajes de aprovechamientos se definen mes a mes.
- Cuando no se puedan aplicar las pruebas estadísticas se garantiza la ocurrencia de un evento con una duración igual a la media más 25% de la desviación estándar.

Caudal aprovechable

Porcentajes obtenidos en algunas plantas relevantes del SIN:



Caudal aprovechable

Se calcularon aprovechamientos máximos para 24 series del sistema con los siguientes resultados

[%] Con Respecto a la media mensual multianual de la información operativa																									
	Bog.No regulado	Alto An	Bajo An	Calima	Salvajina	Chivor	Prado	Guavio	Betania	Jaguas	Playas	Neusa	Chuza	Porce3	Porce2	Sisga	Tominé	Tasajera	San Carlos	Guadalupe	Urrá	Guatapé	Miel	Ituango	Genérico
Enero	41	36	30	74	11	38	14	29	23	26	16	60	61	20	25	36	42	50	14	26	41	21	9	26	32
Febrero	9	19	23	36	67	11	10	18	24	22	34	56	53	16	22	33	44	30	11	42	18	19	48	7	28
Marzo	17	57	8	56	73	11	12	44	15	19	38	55	59	7	21	40	51	4	11	20	6	28	54	28	31
Abril	57	56	59	44	0	19	18	66	52	13	62	53	67	49	23	47	30	18	35	29	66	23	60	19	40
Mayo	52	62	59	78	1	65	68	8	12	14	54	14	15	8	7	62	64	18	48	60	31	14	59	35	38
Junio	0	66	55	78	52	7	72	30	47	1	58	66	64	42	31	2	7	50	1	63	0	1	53	13	36
Julio	71	52	46	79	60	58	32	14	23	20	64	25	4	11	10	72	73	14	47	17	54	29	19	15	38
Agosto	65	58	38	73	66	57	17	52	53	22	29	40	19	17	6	0	74	31	11	64	49	15	26	16	37
Septiembre	67	59	22	49	38	26	20	50	55	20	24	72	62	32	51	69	71	0	61	16	50	56	50	29	44
Octubre	28	57	56	29	67	58	61	50	54	11	15	65	65	12	13	69	23	31	59	7	28	1	10	24	37
Noviembre	46	56	57	26	3	57	66	52	57	13	2	4	63	31	1	67	62	22	43	4	34	3	0	55	34
Diciembre	35	15	20	14	32	56	66	56	41	39	10	65	64	42	41	48	55	16	53	62	51	31	0	14	39

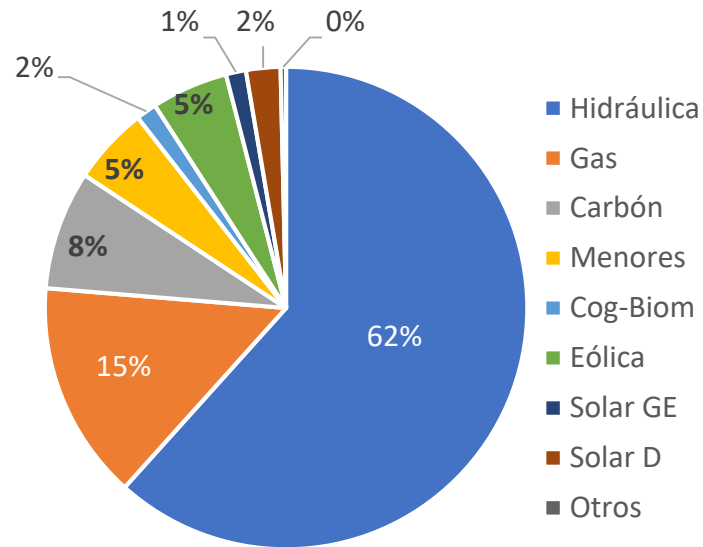
Escenarios Considerados

Criterios para modelamiento de escenarios de expansión de generación

Caso	Descripción
Escenario Hidráulico	Se limita la expansión de la generación eólica a 1.231 MW (Escenario 2 P.E.) Disponible 2.898 MW en generación hidráulica Disponible 1.980 MW en generación térmica a carbón Disponible 147 MW en generación térmica a gas Disponible 1.000 MW de generación solar a gran escala
Escenario Térmico	Se limita la expansión de la generación hidráulica a 1.566 MW (Escenario 2 P.E.) Se limita la expansión de la generación eólica a 1.231 MW (Escenario 2 P.E.) Se limita la generación solar a gran escala a 450 MW (Escenario 2 P.E.) Disponible 1.980 MW en generación térmica a carbón Disponible 147 MW en generación térmica a gas
Escenario Renovable	Se limita la expansión de la generación hidráulica a 1.566 MW (Escenario 2 P.E.) Disponible 4.100 MW de generación eólica Disponible 1.000 MW de generación solar a gran escala Disponible 1.980 MW en generación térmica a carbón Disponible 147 MW en generación térmica a gas

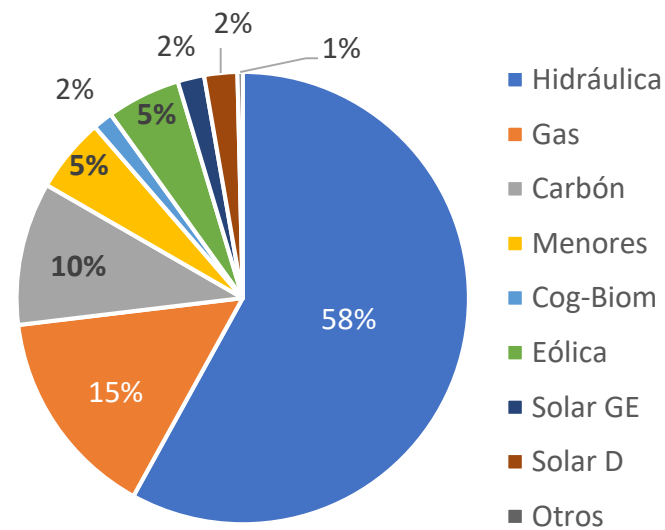
Escenarios Considerados

Escenario 1



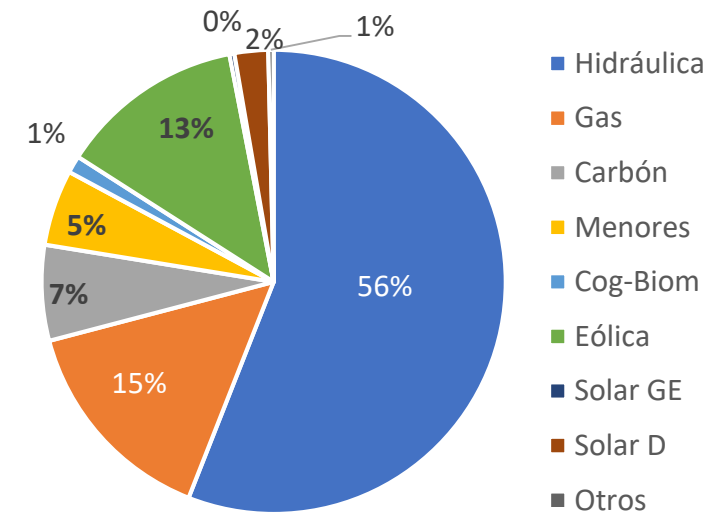
Recurso	Base	Cargo por confiabilidad	Expansión adicional	Total [MW]
Hidráulica	10,963	1,200	2,843	15,005
Gas	3,509	0	57	3,566
Carbón	1,339	250	350	1,939
Menores	787	0	475	1,262
Cog-Biom	126	0	211	337
Eólica	18	0	1,231	1,249
Solar GE	0	0	327	327
Solar D	0	0	560	560
Otros	0	89	0	89
Total	16,742	1,539	6,053	24,334

Escenario 2



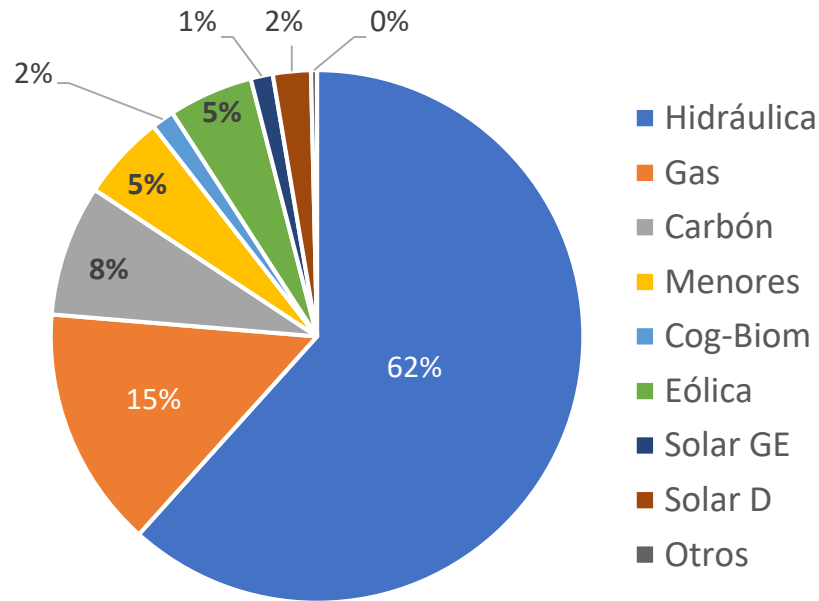
Recurso	Base	Cargo por confiabilidad	Expansión adicional	Total [MW]
Hidráulica	10,963	1,200	1,566	13,729
Gas	3,509	0	57	3,566
Carbón	1,339	250	830	2,419
Menores	787	0	475	1,262
Cog-Biom	126	0	211	337
Eólica	18	0	1,231	1,249
Solar GE	0	0	449	449
Solar D	0	0	560	560
Otros	0	89	0	89
Total	16,742	1,539	5,378	23,659

Escenario 3



Recurso	Base	Cargo por confiabilidad	Expansión adicional	Total [MW]
Hidráulica	10,963	1,200	1,200	13,363
Gas	3,509	0	57	3,566
Carbón	1,339	250	0	1,589
Menores	787	0	475	1,262
Cog-Biom	126	0	161	287
Eólica	18	0	3,058	3,076
Solar GE	0	0	82	82
Solar D	0	0	560	560
Otros	0	89	0	89
Total	16,742	1,539	5,592	23,873

Escenarios Considerados



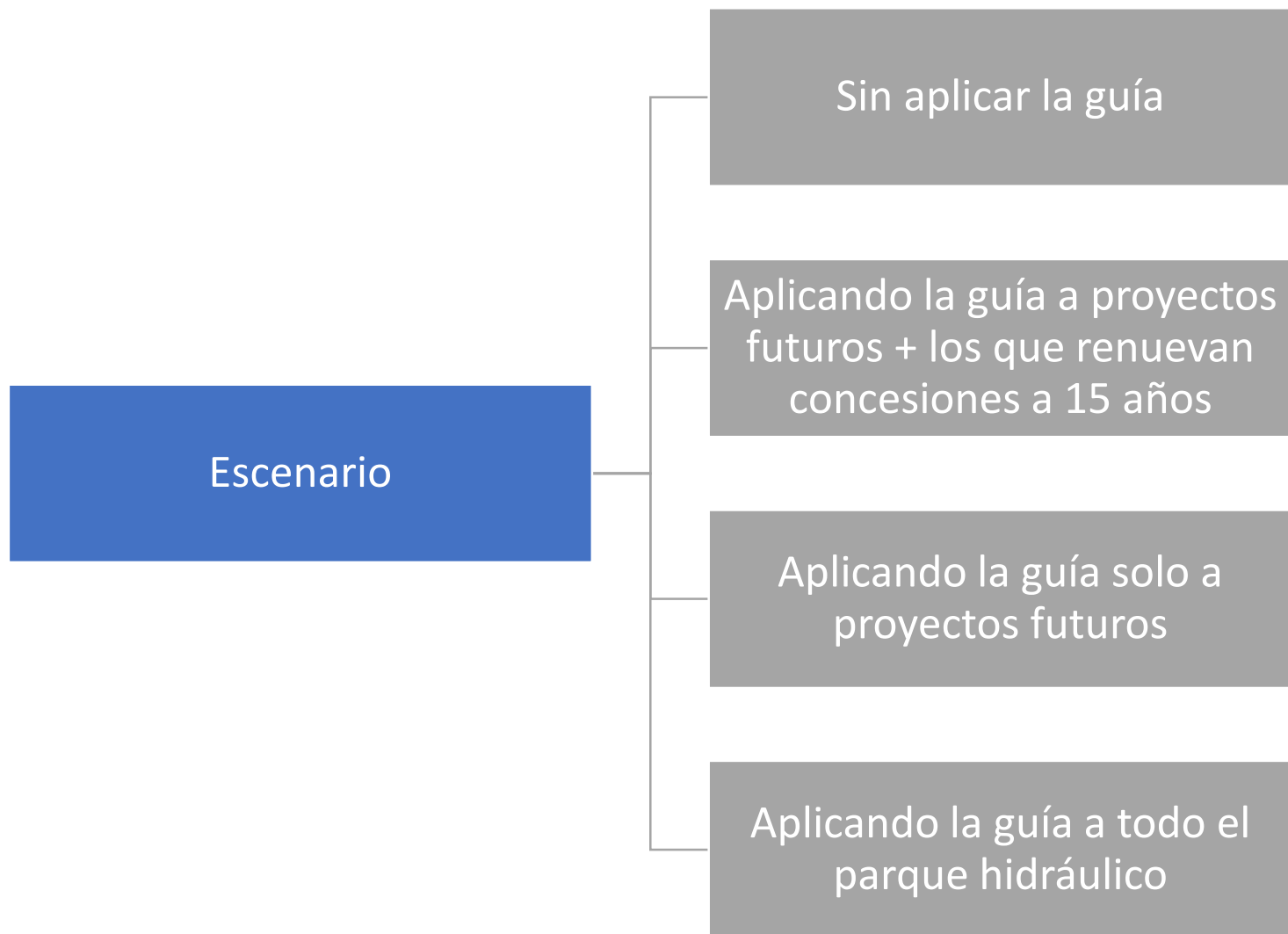
Recurso	Base	Cargo por confiabilidad	Expansión adicional	Total [MW]
Hidráulica	10,963	1,200	2,843	15,005
Gas	3,509	0	57	3,566
Carbón	1,339	250	350	1,939
Menores	787	0	475	1,262
Cog-Biom	126	0	211	337
Eólica	18	0	1,231	1,249
Solar GE	0	0	327	327
Solar D	0	0	560	560
Otros	0	89	0	89
Total	16,742	1,539	6,053	24,334

Cronograma de Expansión Escenario Base

Carga por confiabilidad									
Fecha	Hidráulica	Gas	Carbón	Menores	Cog-Biom	Eólica	Solar GE	Solar D	Otros
nov-17			250.0						
ago-18									88.6
nov-18	300.0								
feb-19	300.0								
may-19	300.0								
ago-19	300.0								
Total	1200	0	250	0	0	0	0	0	88.6

Expansión Adicional									
Año	Hidráulica	Gas	Carbón	Menores	Cog-Biom	Eólica	Solar GE	Solar D	Otros
2017				20	36		10	29	
2018		57			38				
2019							72		
2020				165	40	182		97	
2021	600								
2022	600				35				
2023				48		669		132	
2024						380	70		
2025					7				
2026				81	5			150	
2027	1,041								
2028									
2029	55			97				112	
2030	502						49		
2031	45		350	64	50		126	40	
Total	2,843	57	350	475	211	1,231	327	560	0

Simulaciones realizadas



Supuestos – Simulación Energética

Consideraciones para la simulación energética

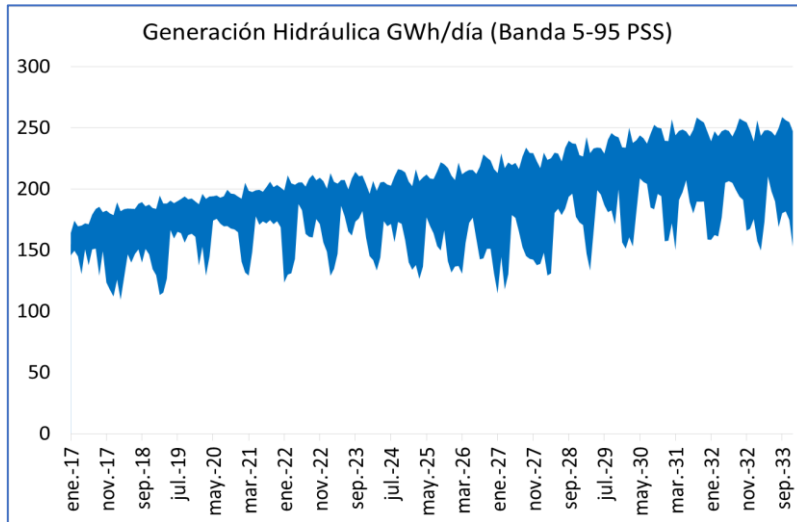
- Las plantas hidroeléctricas existentes operarán como filo de agua ante la aplicación de la metodología.
- Como consecuencia del punto anterior se elimina la Curva de aversión al riesgo (CAR) para el escenario en que la metodología aplica a todo el parque hidroeléctrico.
- Se considera la topología real del sistema
- Se modelan el aprovechamiento real más restrictivo obtenido de las sensibilidades al (Q_B) y (Q_{t-q}) como restricciones operativas para cada una de las plantas hidroeléctricas.
- Para las plantas menores y proyectos de los cuales no se cuenta con información suficiente para aplicar la metodología, se aplica el porcentaje medio de los aprovechamientos.
- En caso de trasvases, se debe cumplir que el caudal natural más el caudal turbinado (caudal trasvasado) no puede ser mayor que el caudal máximo de la cuenca receptora para cada mes en el punto de descarga.
- En caso de turbinamiento sobre la misma cuenca de captación, se debe cumplir que el caudal ambiental más el caudal turbinado no puede ser mayor que el caudal máximo para cada mes en el punto de descarga.

Resultados Escenario

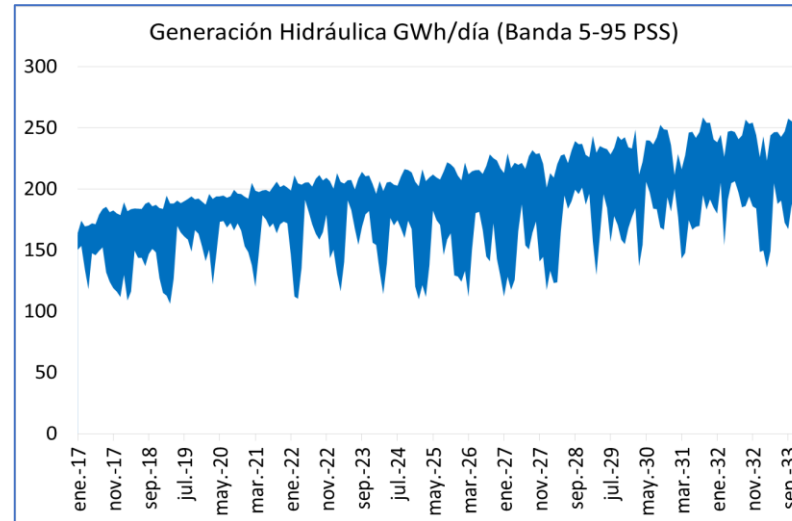


Resultados - Generación hidráulica

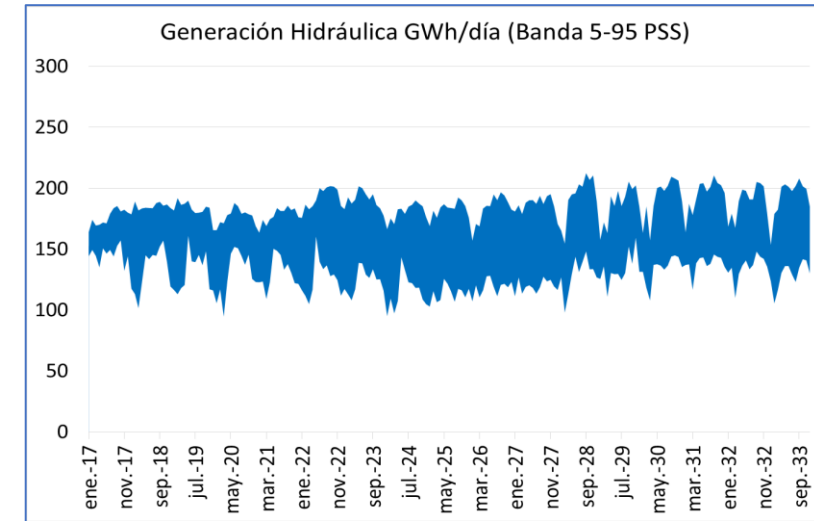
Sin guía



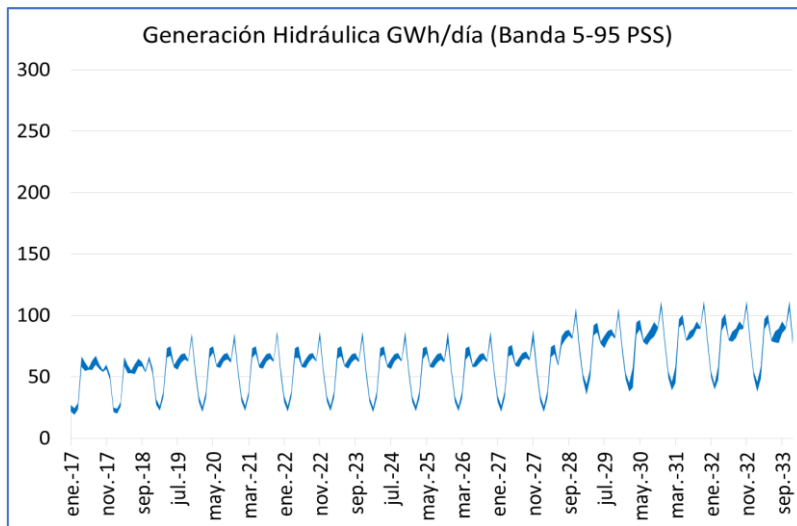
Proyectos futuros



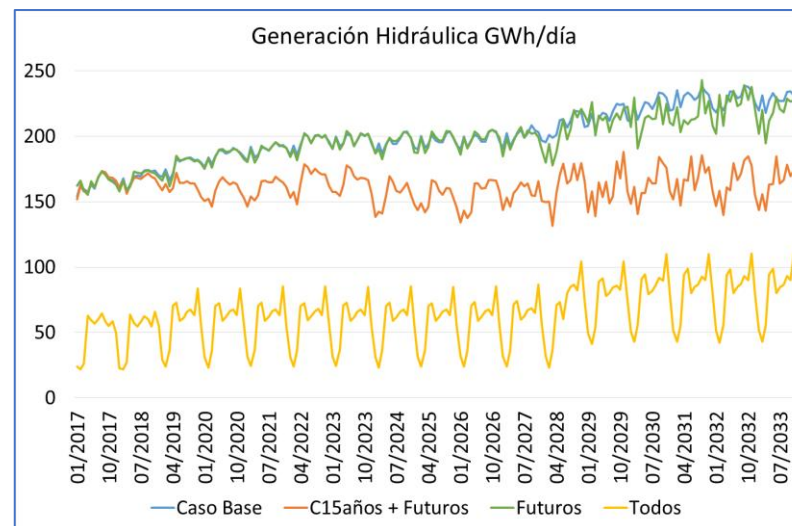
Proyectos futuros + Concesiones 15 años



Todos los proyectos hidroeléctricos

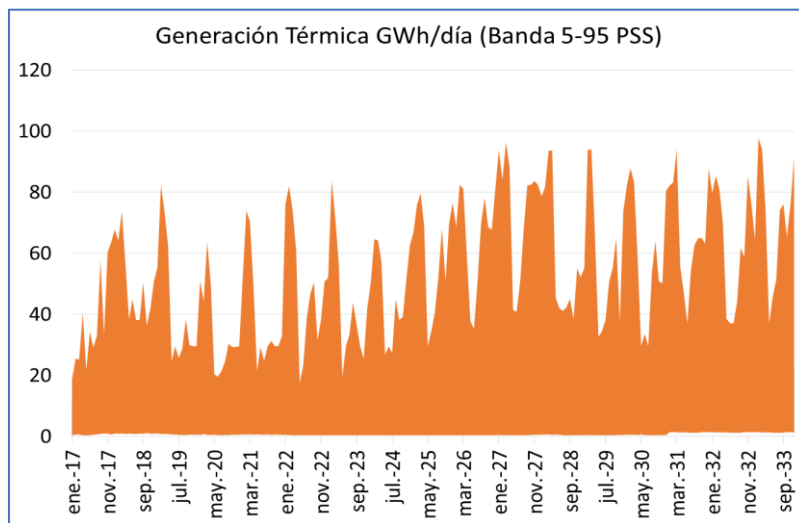


Comparación valores medios

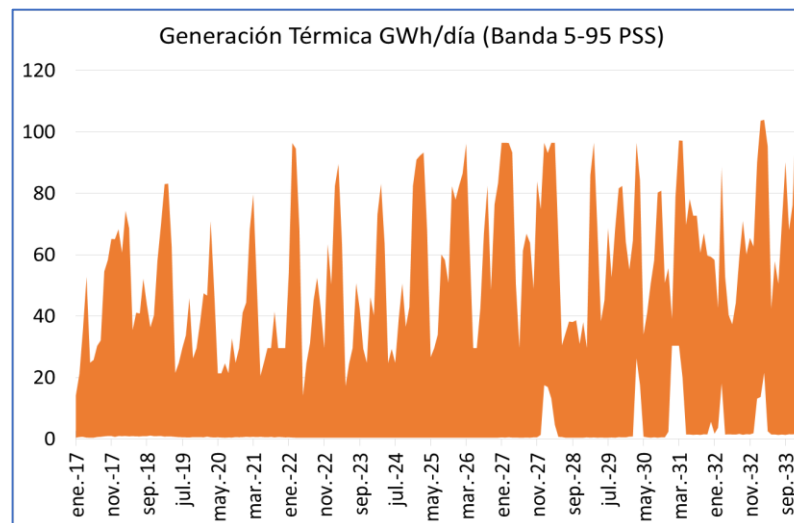


Resultados -Generación Térmica

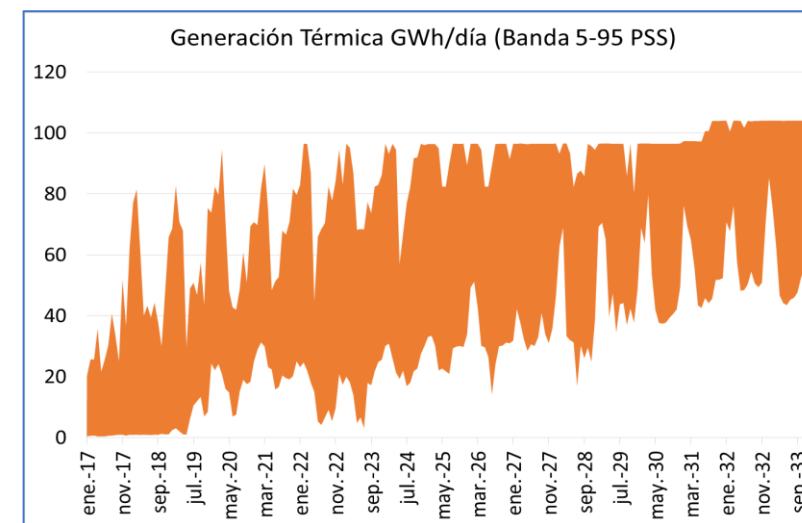
Sin guía



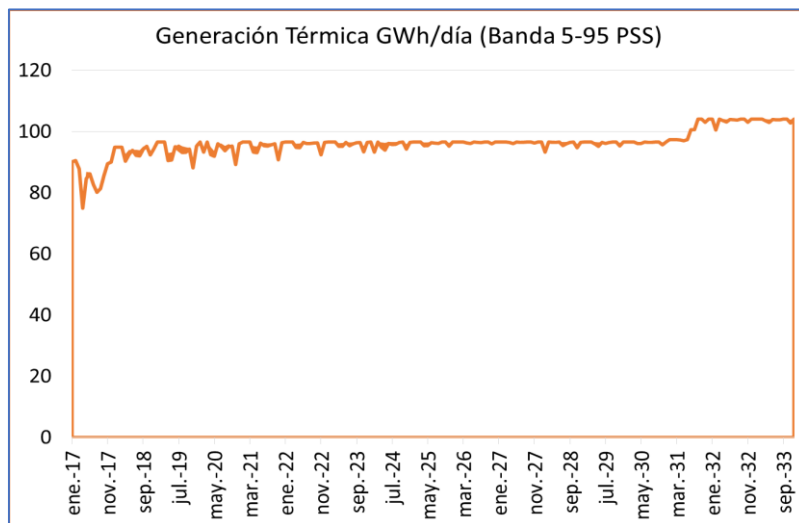
Proyectos futuros



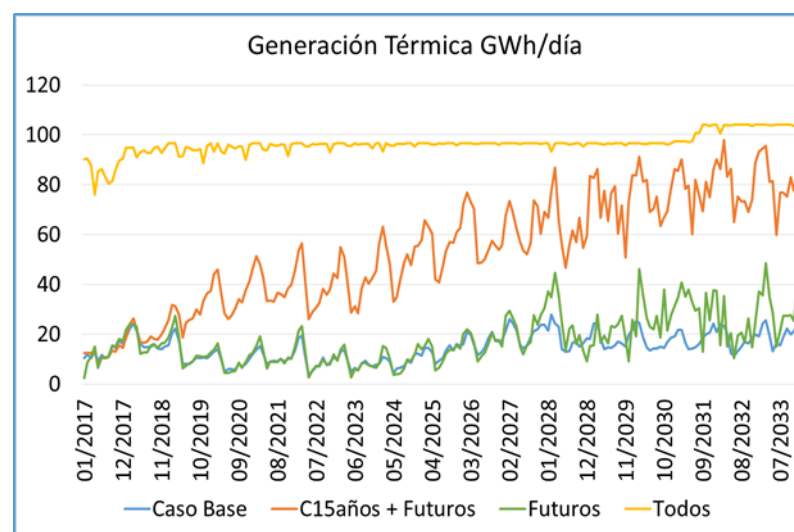
Proyectos futuros + Concesiones 15 años



Todos los proyectos hidroeléctricos



Comparación valores medios

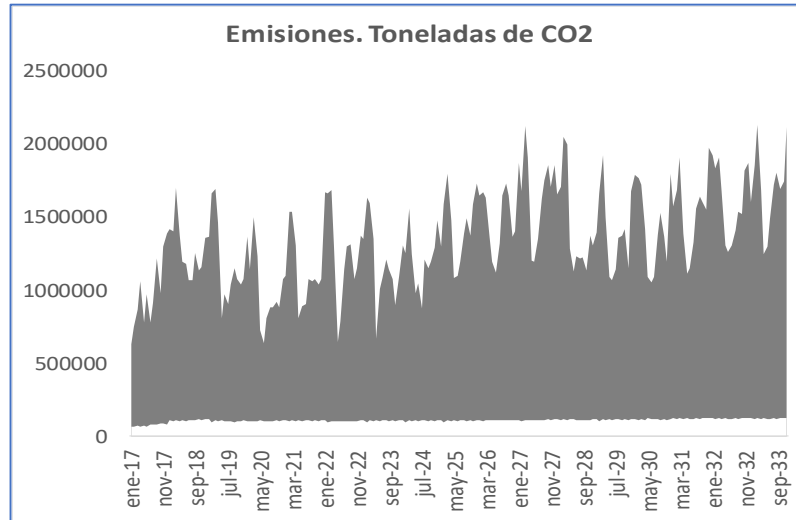


Bajo el escenario expansión térmica:

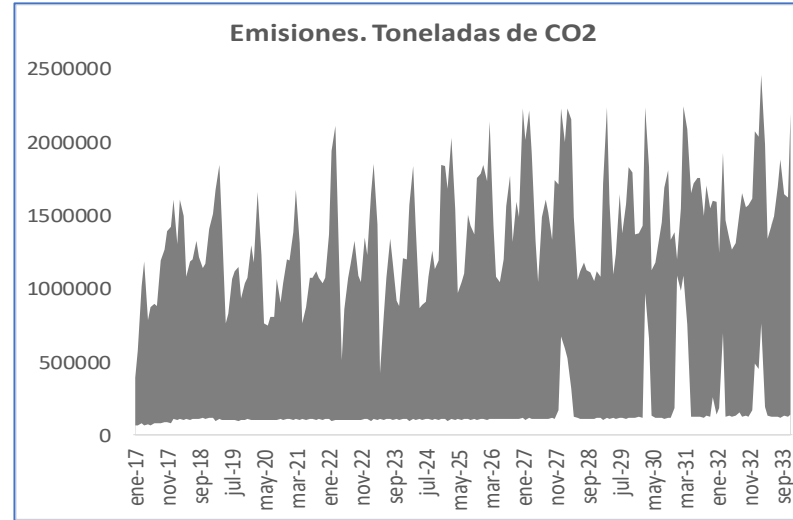
- Incremento adicional en gen térmica promedio (50% respecto al escenario expansión hidráulico de proyectos futuros)

Resultados - Emisiones

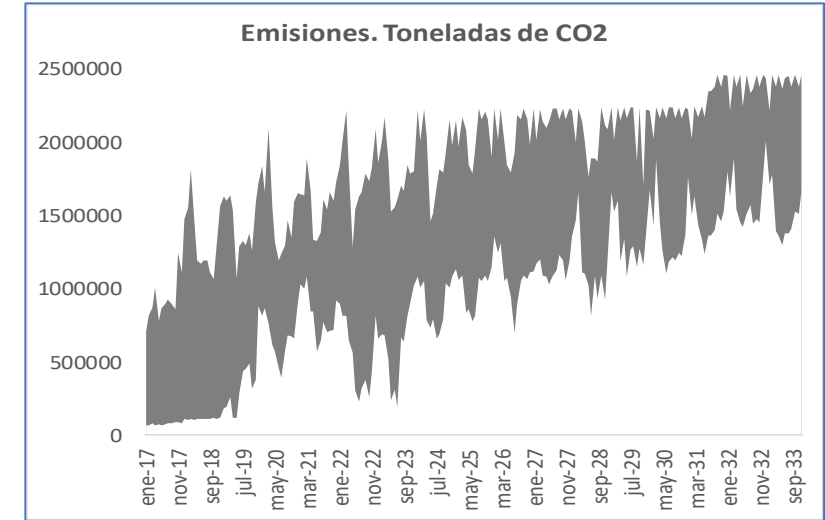
Sin guía



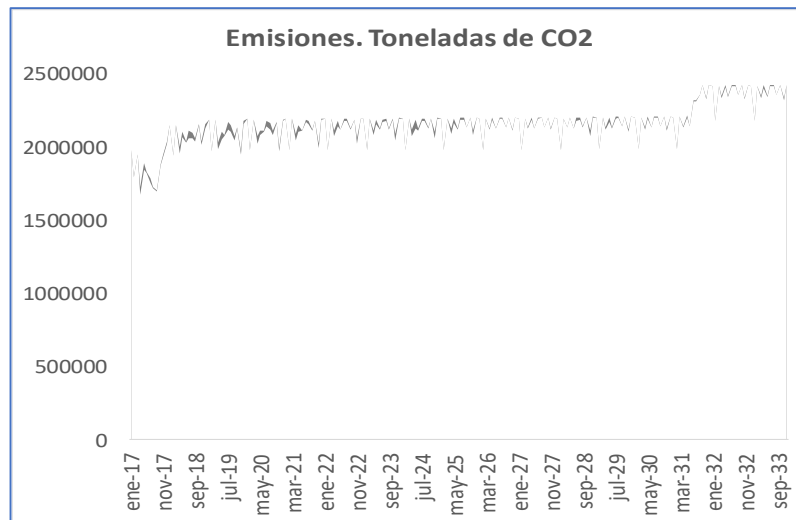
Proyectos futuros



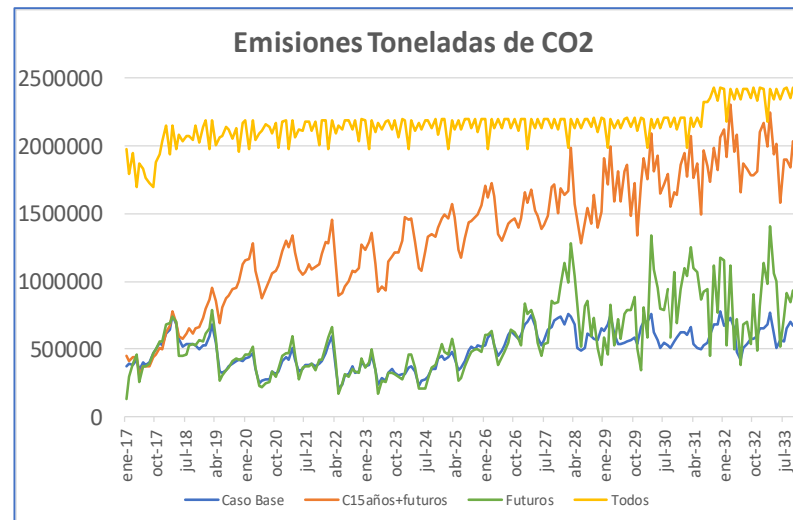
Proyectos futuros + Concesiones 15 años



Todos los proyectos hidroeléctricos



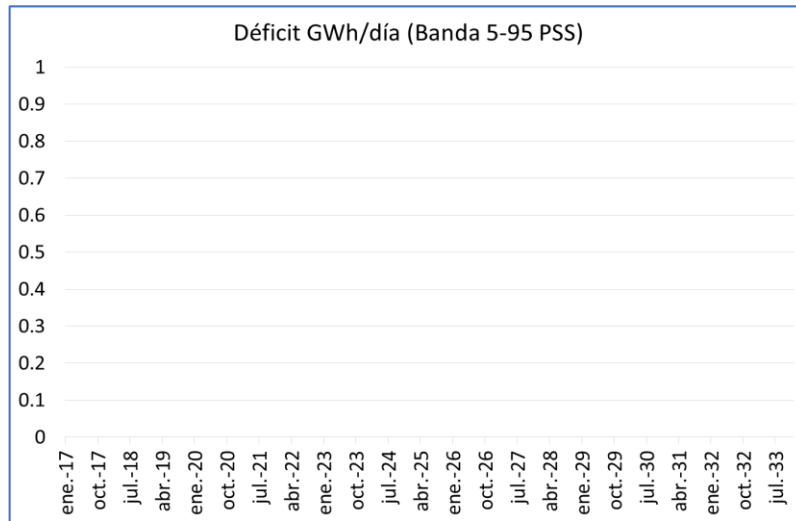
Comparación valores medios



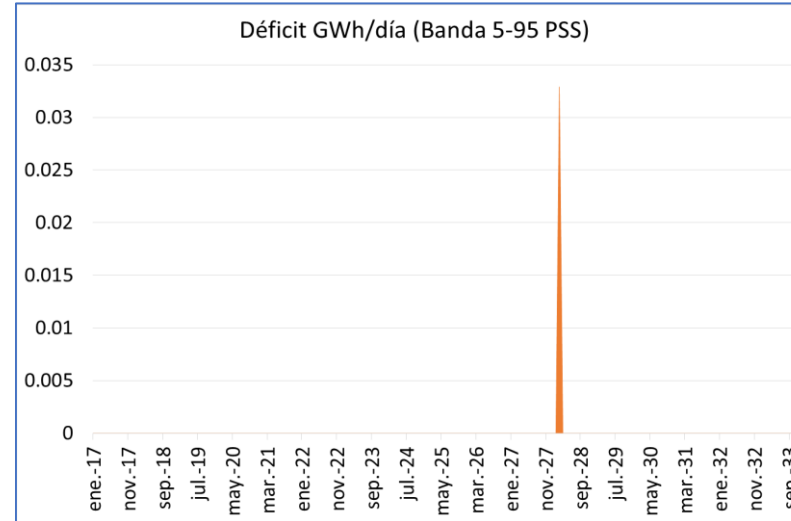
Año	base	Futuros	Futuros + 15	Todos
Millones de Toneladas de CO2	7,31	10,0	21,6	27,0

Resultados: Déficit

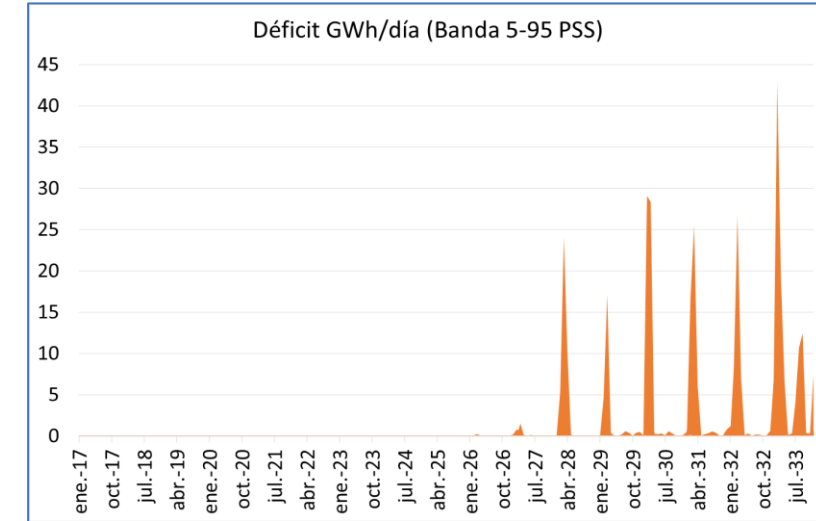
Sin guía



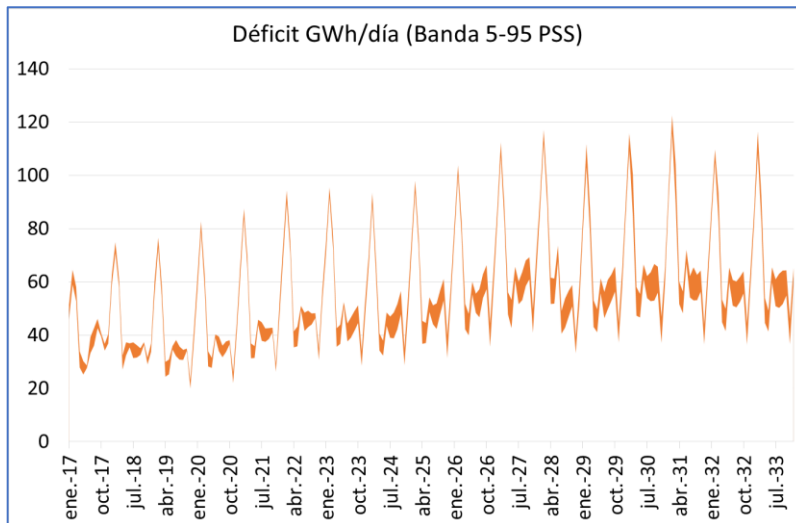
Proyectos futuros



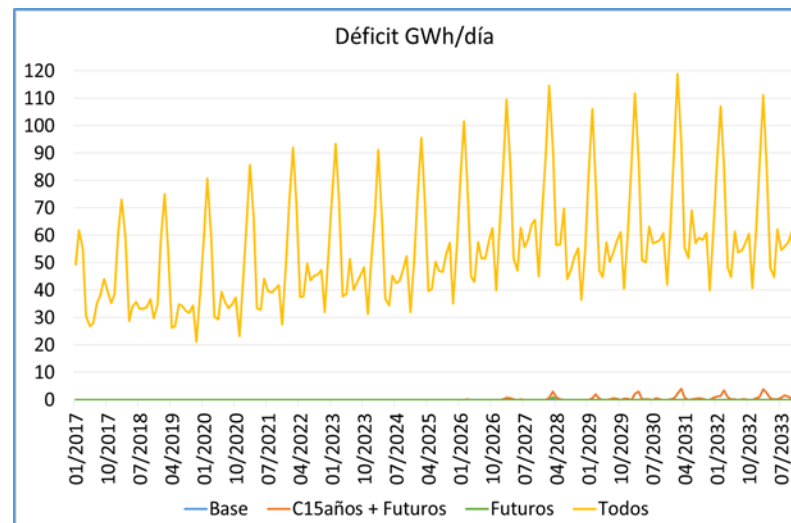
Proyectos futuros + Concesiones 15 años



Todos los proyectos hidroeléctricos



Comparación valores medios

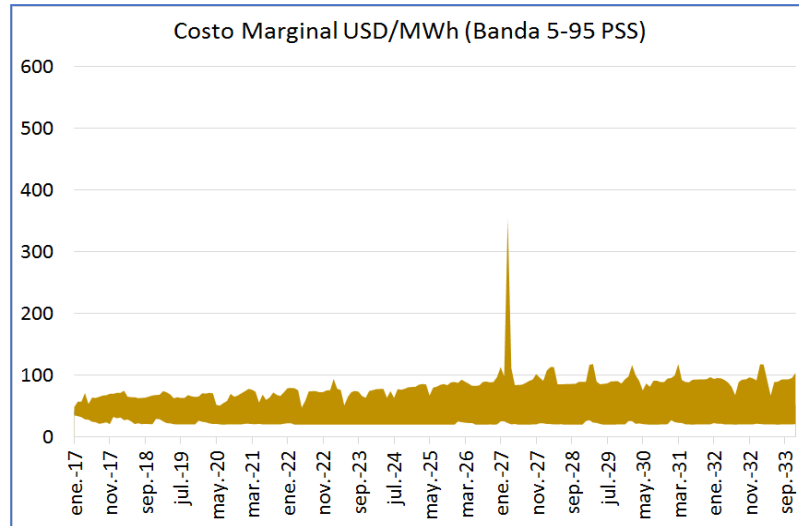


Bajo el escenario expansión térmica:

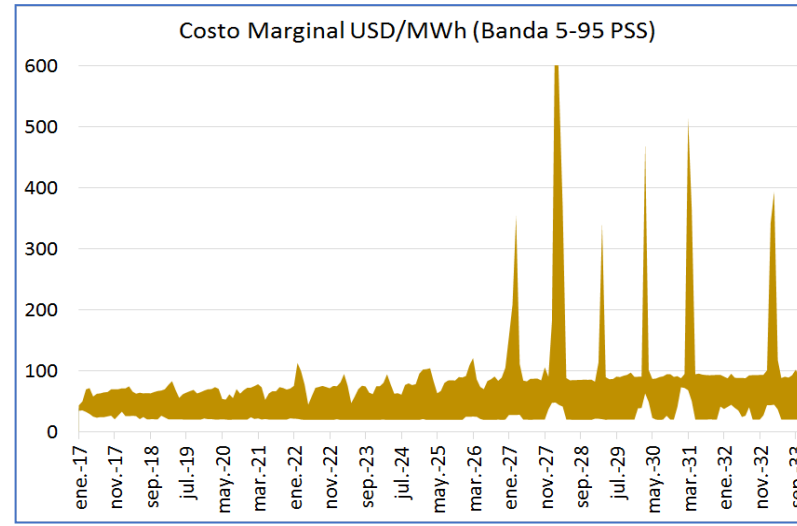
- Reducción del déficit respecto al escenario expansión hidráulico de proyectos futuros.

Resultados - Costo Marginal

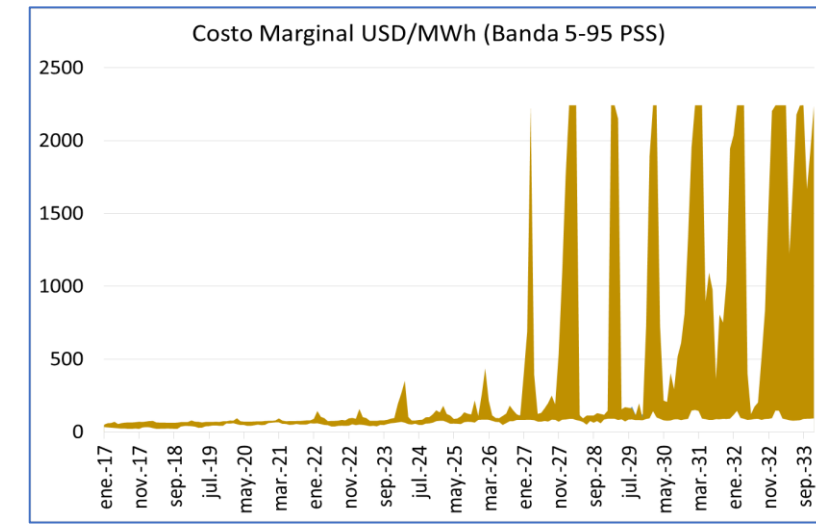
Sin guía



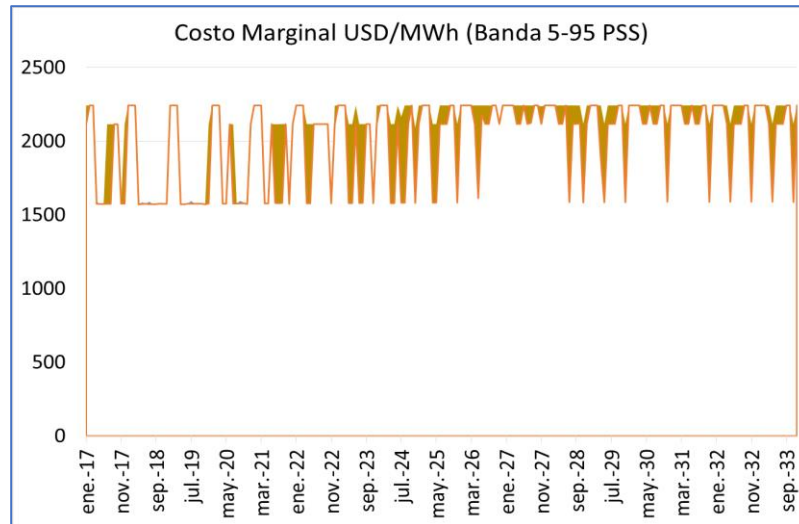
Proyectos futuros



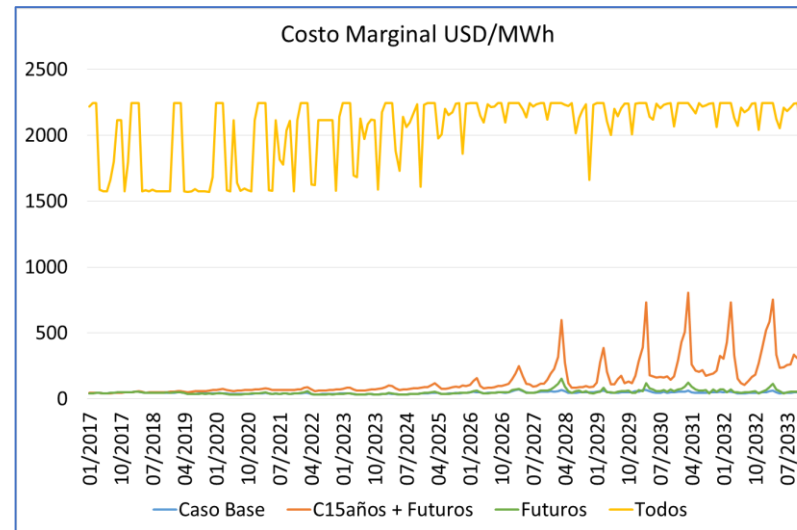
Proyectos futuros + Concesiones 15 años



Todos los proyectos hidroeléctricos



Comparación valores medios

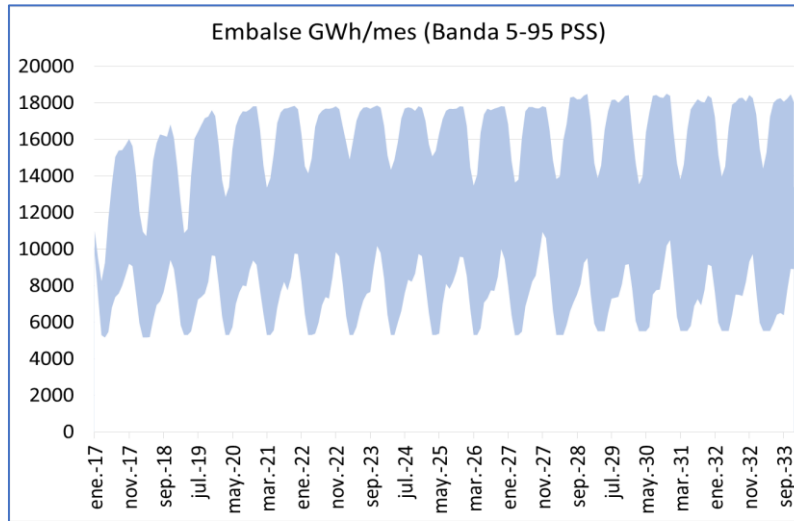


Bajo el escenario expansión térmica:

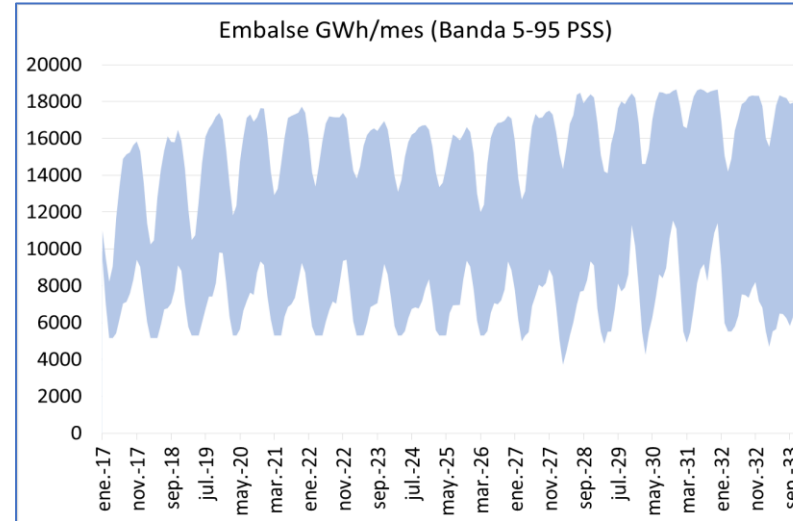
- Incremento adicional en los costos marginal promedio 15% respecto al escenario expansión hidráulico de proyectos futuros

Resultados: Reserva del SIN

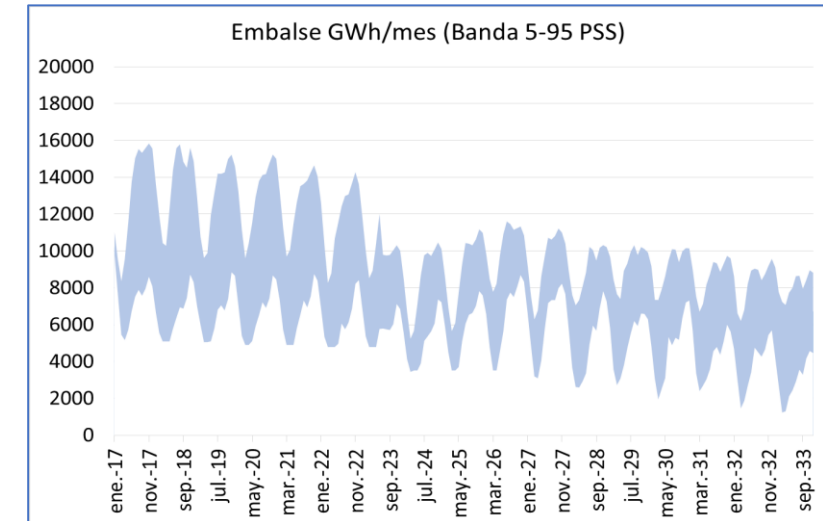
Sin guía



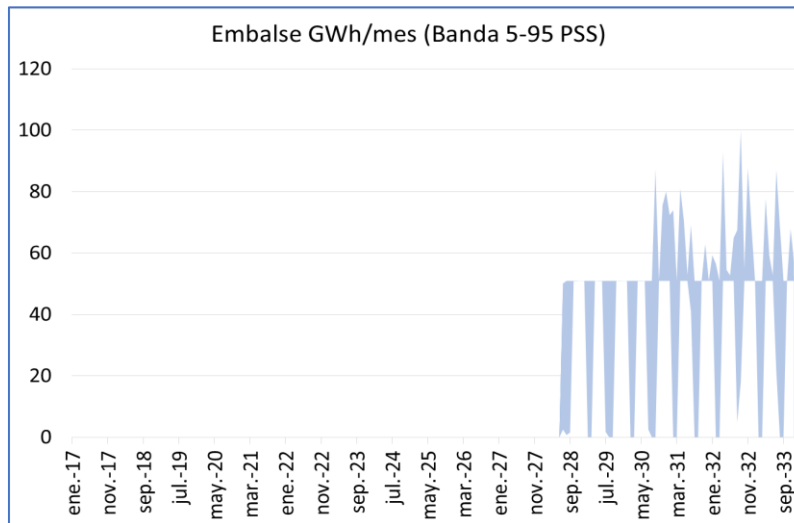
Proyectos futuros



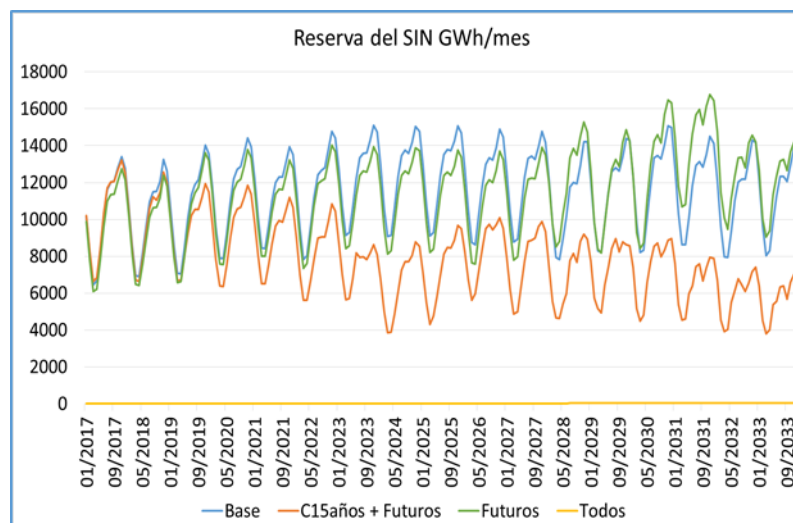
Proyectos futuros + Concesiones 15 años



Todos los proyectos hidroeléctricos



Comparación valores medios



Conclusiones

Bajo los supuestos considerados y escenarios simulados se identifica que las restricciones planteadas por la metodología para estimación del caudal ambiental a través del aprovechamiento máximo y limitaciones en los turbinamientos en las centrales hidroeléctricas presentan los siguientes efectos:

Aplicación solo a proyectos futuros

- Alto riesgo de la atención de la demanda, se evidencian periodos con déficit.
- Aumento de emisiones de gases de efecto invernadero. (Aumento del 42% en gen térmica promedio y 37% de emisiones de CO₂)*
- Incremento en los costos operativos. (Aumento del 26% de los costos marginales promedio del sistema)*

** Situación más crítica cuando es considerado el escenario de expansión de generación térmica*

Aplicación a proyectos futuros + renovación de concesiones a 15 años

- Imposibilidad de la atención de la demanda, se presentan casos con déficit recurrente, especialmente en periodos de baja hidrología.
- Aumento de emisiones de gases de invernadero. (Aumento del 310% en gen térmica promedio y 195% de emisiones de CO₂)
- Incremento en los costos operativos. (Aumento del 26% de los costos marginales promedio del sistema)

Aplicación a proyectos futuros + proyectos existentes

- Imposibilidad de la atención de la demanda, se presentan casos con déficit bajo todos los escenarios.
- Aumento de emisiones de gases de efecto invernadero. (Aumento del 445% en gen térmica promedio y 270% de emisiones de CO₂)
- Incremento en los costos operativos. (Aumento del 26% de los costos marginales promedio del sistema)

Conclusiones

Riesgos de atención de la demanda

- El aprovechamiento máximo de caudales limita la energía eléctrica que pueden generar las plantas hidráulicas.
- La limitación en los turbinamientos afectan los ciclos de las reservas hidráulicas, los cuales permiten garantizar la confiabilidad de abastecimiento de la demanda en periodos de baja hidrología.
- Se presentan incumplimientos en los indicadores de confiabilidad para la atención de la demanda definidos en la reglamentación vigente.
- La flexibilidad del SIN actualmente esta soportada en la capacidad de regulación de los recursos hídricos, reducir dicha capacidad conlleva a la disminución de la flexibilidad del sistema haciéndolo mas vulnerable ante variaciones de la demanda, eventos en la red de transmisión y de recursos de generación, y ante la intermitencia de la generación propia de las Fuentes de Energía Renovable no Convencionales.
- La aplicación de la guía ante condiciones operativas diarias pueden generar a déficits de potencia del sistema adicionales a los mencionados anteriormente, las cuales no son evidentes en el ejercicio dada la resolución mensual considerada y la no inclusión de la red de transmisión.

Incremento de la generación térmica y las emisiones de gases de efecto invernadero

- La generación térmica presenta una tendencia creciente ante la disminución de las reservas hídricas con su consecuente incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero. Esta condición es contraria a lo expresado por el Ministerio de Minas y Energía ante la comisión intersectorial de cambio climático en donde se tiene un compromiso de reducción del 20% de emisiones a 2030 en búsqueda del cumplimiento las metas del país ante el COP21.

Conclusiones

Incremento de la generación térmica y las emisiones de gases de efecto invernadero

- La generación térmica presenta una tendencia creciente ante la disminución de las reservas hídricas con su consecuente incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero. Esta condición es contraria a lo expresado por el Ministerio de Minas y Energía ante la comisión intersectorial de cambio climático en donde se tiene un compromiso de reducción del 20% de emisiones a 2030 en búsqueda del cumplimiento las metas del país ante el COP21.

Costo de la prestación del servicio de la Energía Eléctrica

Lo siguientes aspectos tienen un impacto directo en la tarifa de energía eléctrica de los usuarios finales:

- Incremento en el costo total de operación del sistema, costos marginales y precios de bolsa.
- Necesidad de una mayor expansión de capacidad instalada y los requerimientos en red asociados a esta expansión. Esta necesidad ante la presencia de déficits y la reducción de Energía Firme de los recursos hidráulicos.
- Necesidad de inversiones en otras tecnologías que pueda de alguna forma suplir algunos servicios prestados actualmente gracias a la capacidad de regulación de los recursos hidráulicos.
- La reducción de costos esperada con la entrada de Fuentes de Energía Renovable no Convencional no sería percibida por el usuario final dada la necesidad de otros elementos que aporten la flexibilidad requerida por el sistema.
- Incrementos en los costos de instalación de nuevos recursos hidráulicos al considerar la infraestructura necesaria para el cumplimiento de la guía.

Conclusiones

Otros riesgos identificados:

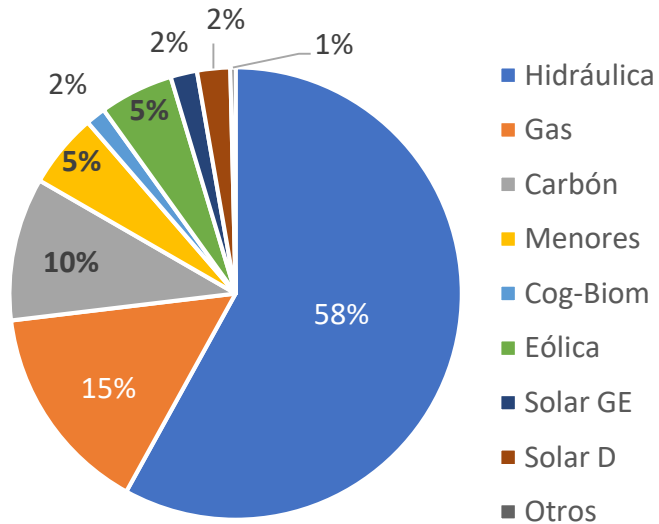
- La restricción planteada al recurso primario hidráulico desincentiva el uso de esta tecnología como alternativa en la expansión de capacidad del sistema, limitando el gran potencial que actualmente tiene el país de este recurso que es considerado competitivo y limpio.
- La reducción de la flexibilidad del sistema limita la integración de las Fuentes de Energía Renovable no Convencionales, dado que las mismas por su característica de generación intermitente requieren de esta flexibilidad del sistema que soporten dicha intermitencia.
- Ante la señal de uso restringido del agua y la limitación a la integración de las Fuentes de Energía Renovable no Convencionales por la pérdida de flexibilidad del sistema, se da una señal a que la expansión sea realizada con recursos térmicos, lo que impacta directamente las emisiones de gases de efecto invernadero y el cumplimiento de metas asociada a estas emisiones.
- Para reducir los riesgos evidenciados, la atención de la demanda de energía eléctrica podría depender altamente de intercambios internacionales de los cuales no se cuenta con firmeza. A su vez, la aplicación de la guía convierte al sistema Colombiano como un país importador, limitando las posibles intercambios con mercados como el centro americano.
- Restricciones operativas de los embalses existentes los cuales no fueron diseñados para permitir el paso de caudales que no sean de rebose. A su vez existe la incapacidad de operar continuamente con caudales de rebose ya que se atenta contra la vida útil de los embalses.

Muchas Gracias



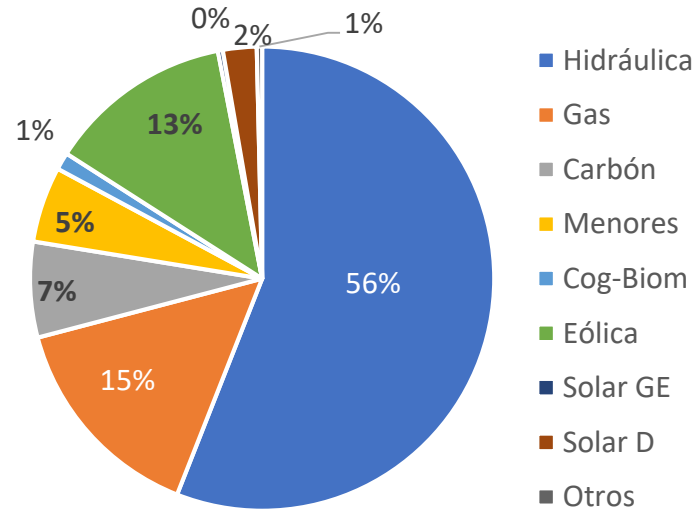
Escenarios Considerados

Escenario 2



Recurso	Base	Cargo por confiabilidad	Expansión adicional	Total [MW]
Hidráulica	10,963	1,200	1,566	13,729
Gas	3,509	0	57	3,566
Carbón	1,339	250	830	2,419
Menores	787	0	475	1,262
Cog-Biom	126	0	211	337
Eólica	18	0	1,231	1,249
Solar GE	0	0	449	449
Solar D	0	0	560	560
Otros	0	89	0	89
Total	16,742	1,539	5,378	23,659

Escenario 3

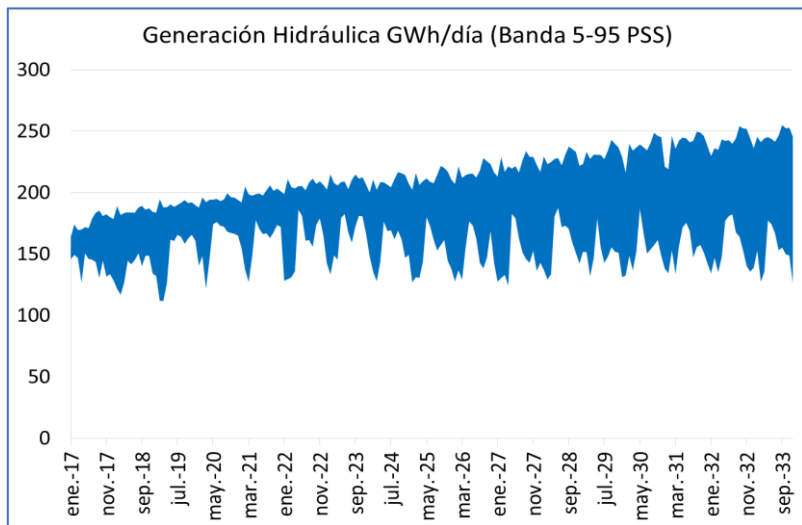


Recurso	Base	Cargo por confiabilidad	Expansión adicional	Total [MW]
Hidráulica	10,963	1,200	1,200	13,363
Gas	3,509	0	57	3,566
Carbón	1,339	250	0	1,589
Menores	787	0	475	1,262
Cog-Biom	126	0	161	287
Eólica	18	0	3,058	3,076
Solar GE	0	0	82	82
Solar D	0	0	560	560
Otros	0	89	0	89
Total	16,742	1,539	5,592	23,873

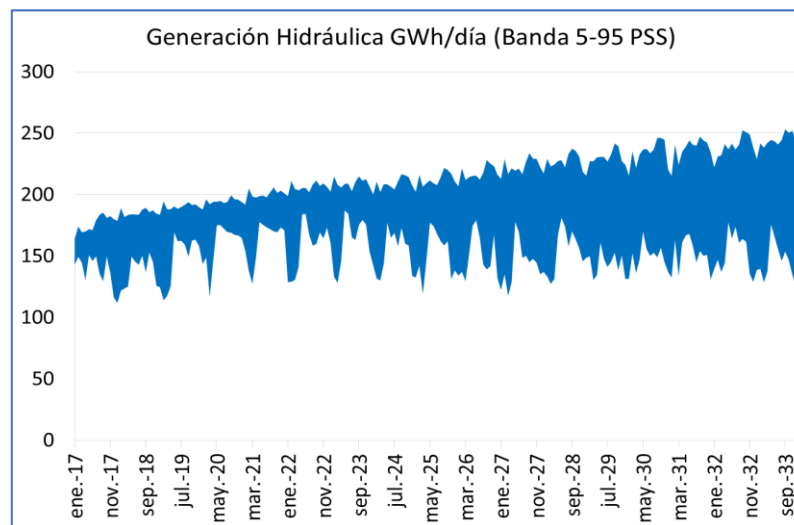
Resultados Escenario 2



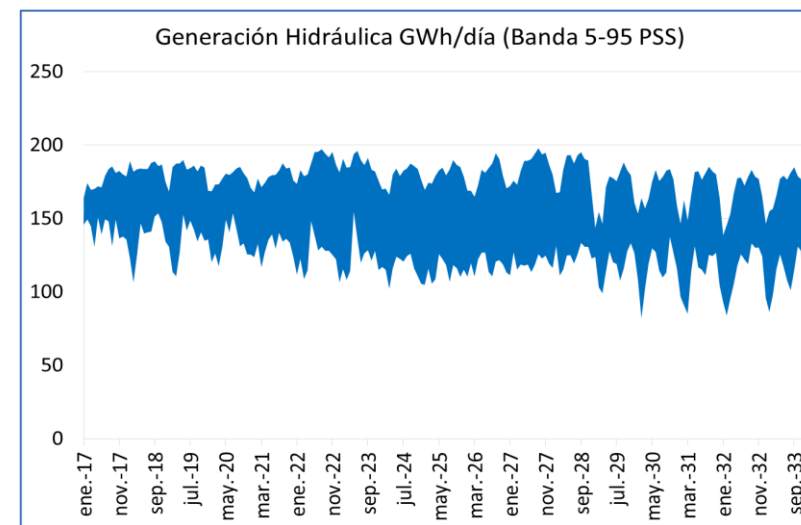
Sin guía



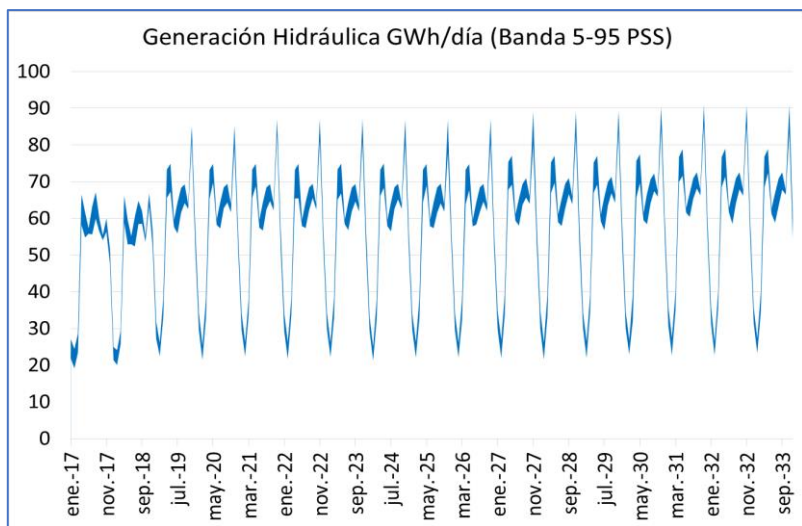
Proyectos futuros



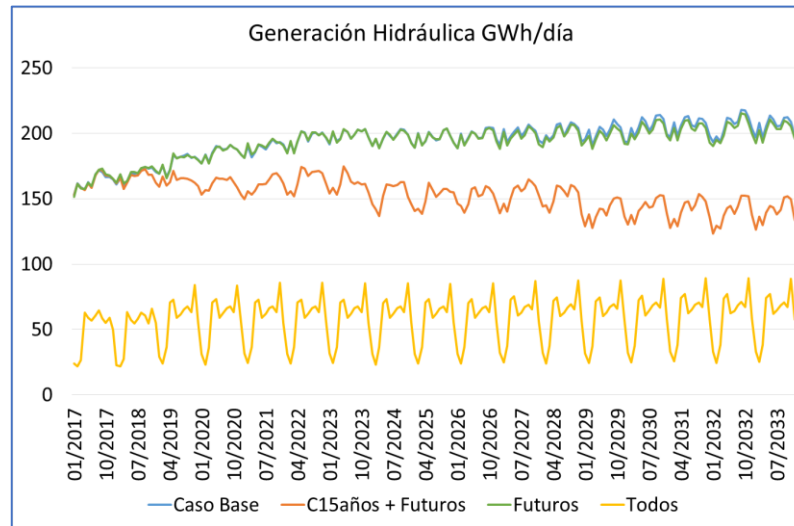
Proyectos futuros + Concesiones 15 años



Todos los proyectos hidroeléctricos

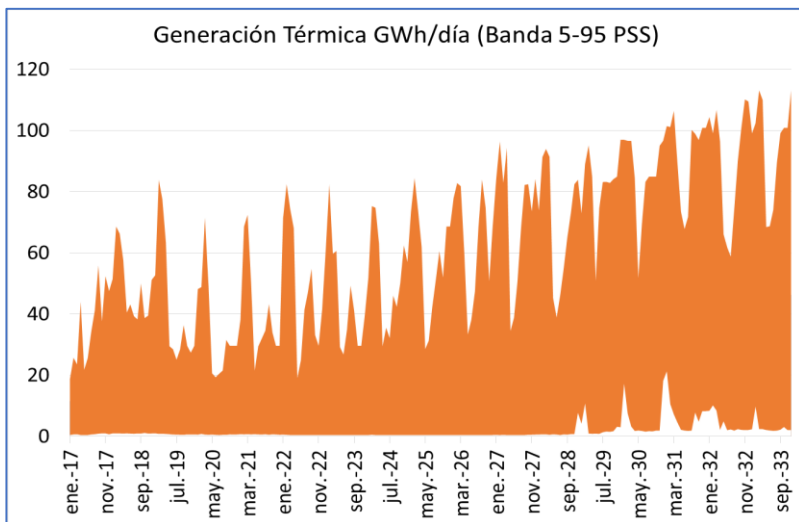


Comparación valores medios

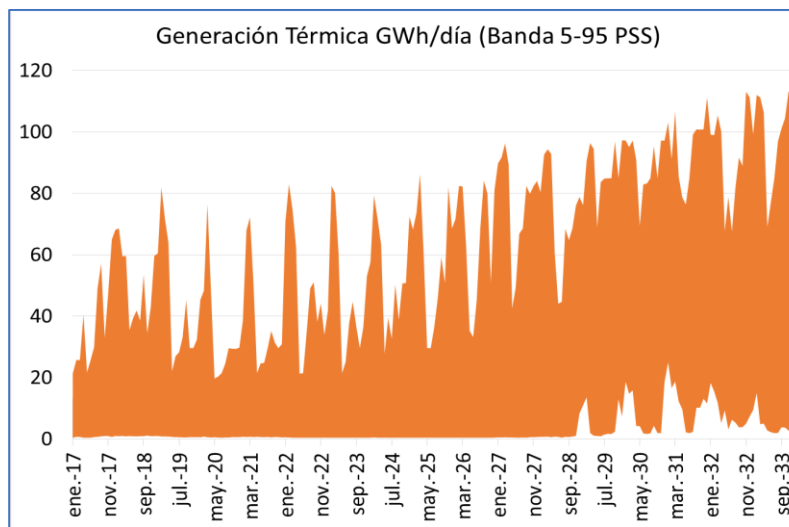


Resultados - Generación Térmica

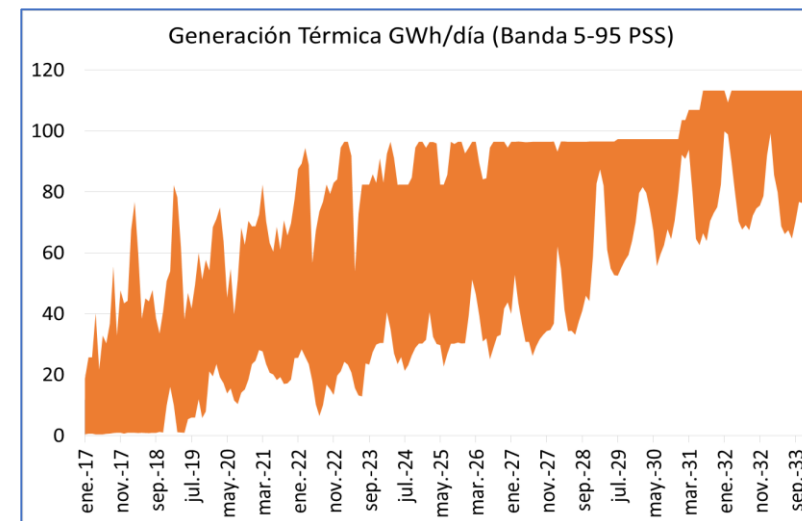
Sin guía



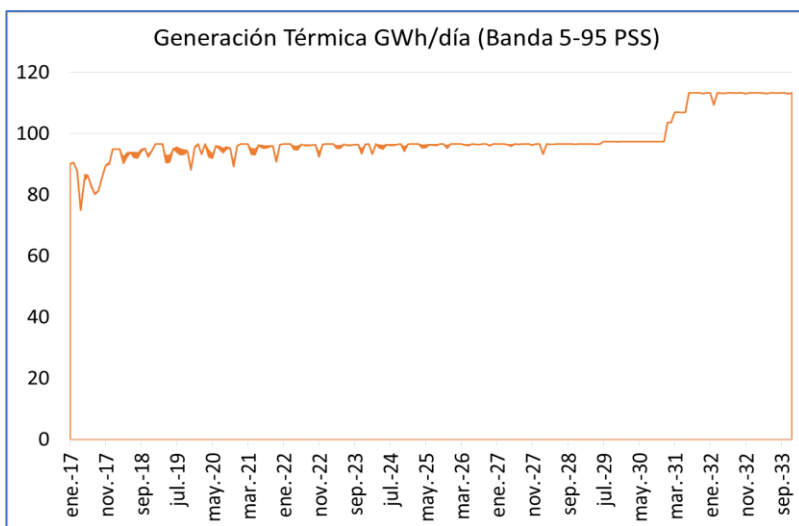
Proyectos futuros



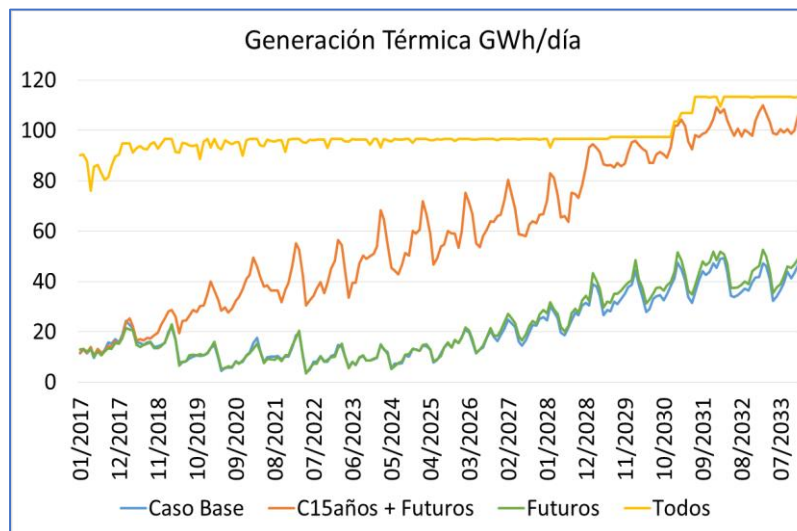
Proyectos futuros + Concesiones 15 años



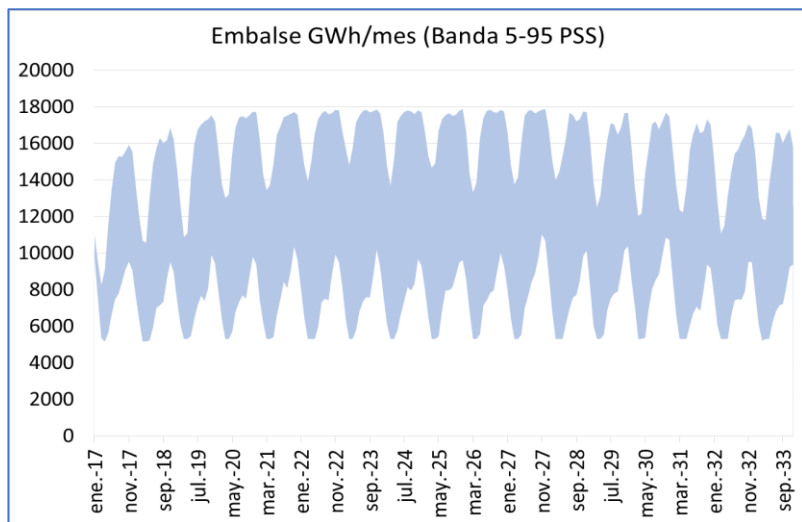
Todos los proyectos hidroeléctricos



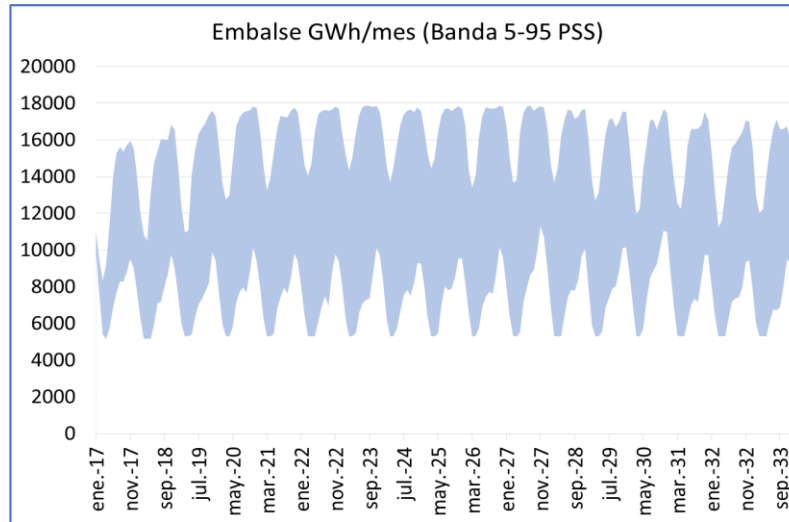
Comparación valores medios



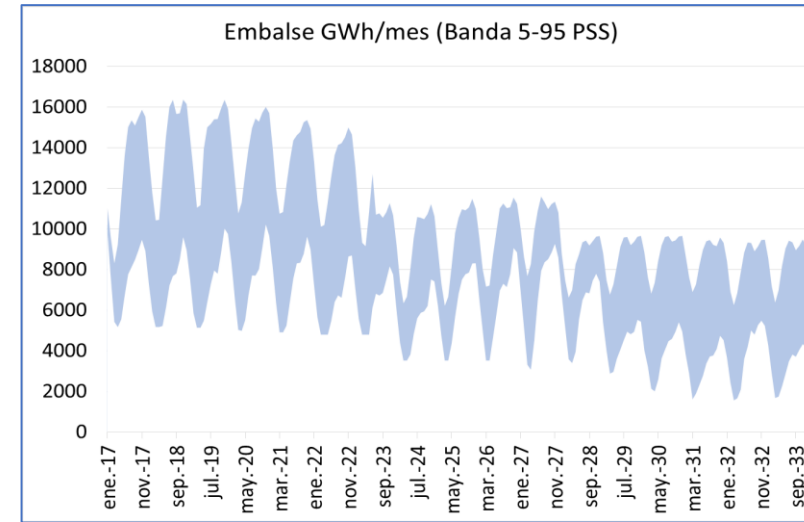
Sin guía



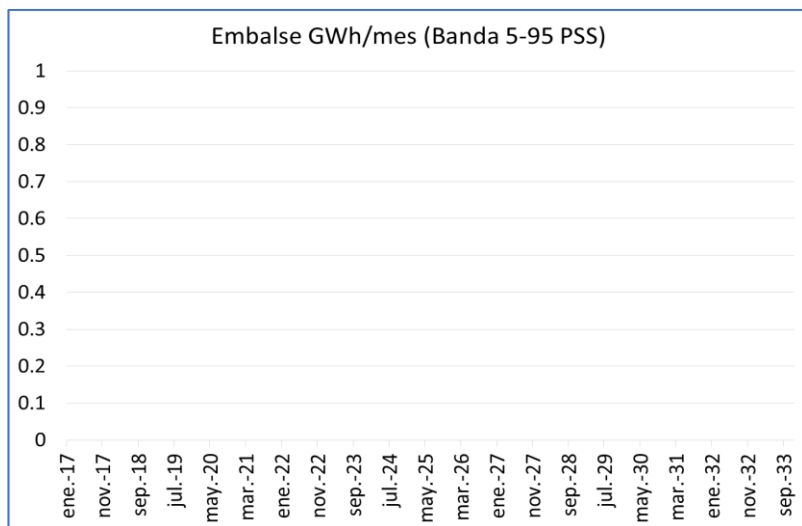
Proyectos futuros



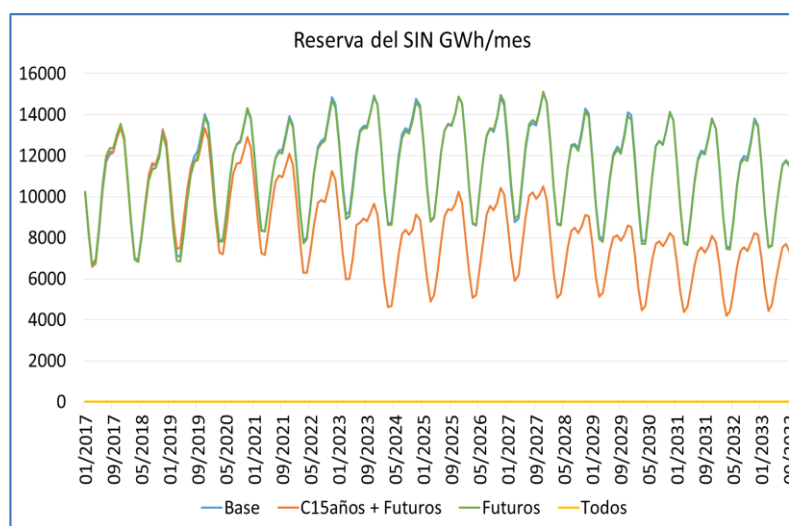
Proyectos futuros + Concesiones 15 años



Todos los proyectos hidroeléctricos

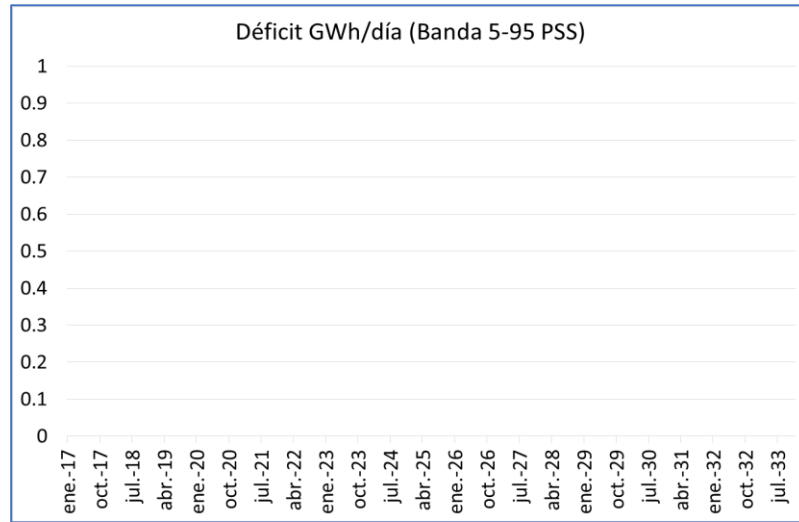


Comparación valores medios

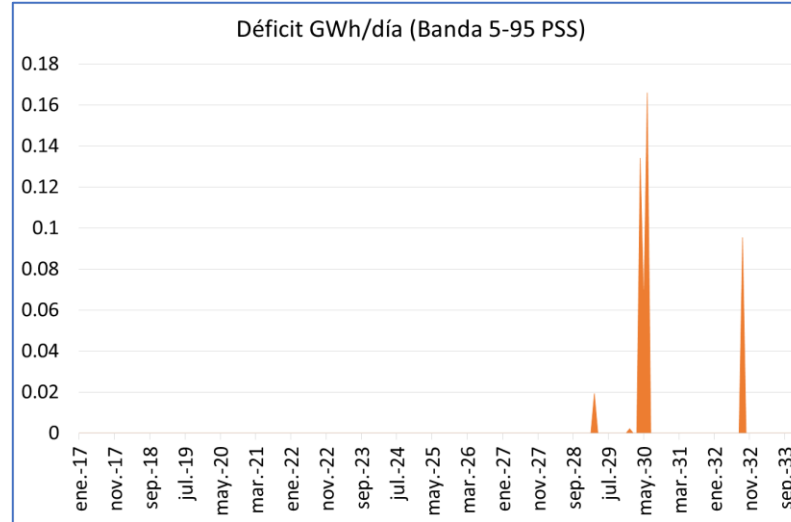


Resultados - Déficit

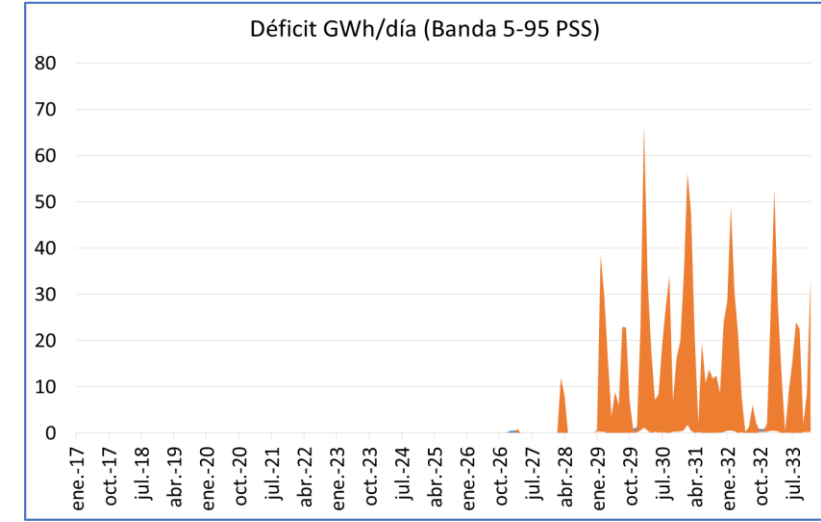
Sin guía



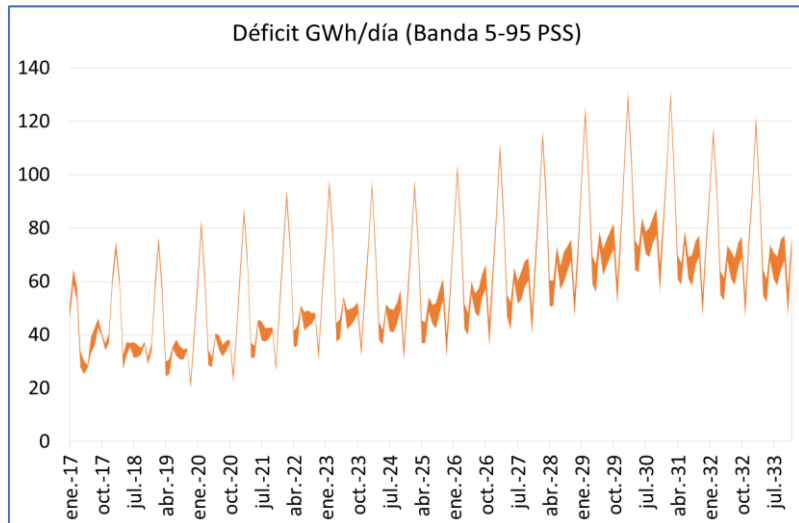
Proyectos futuros



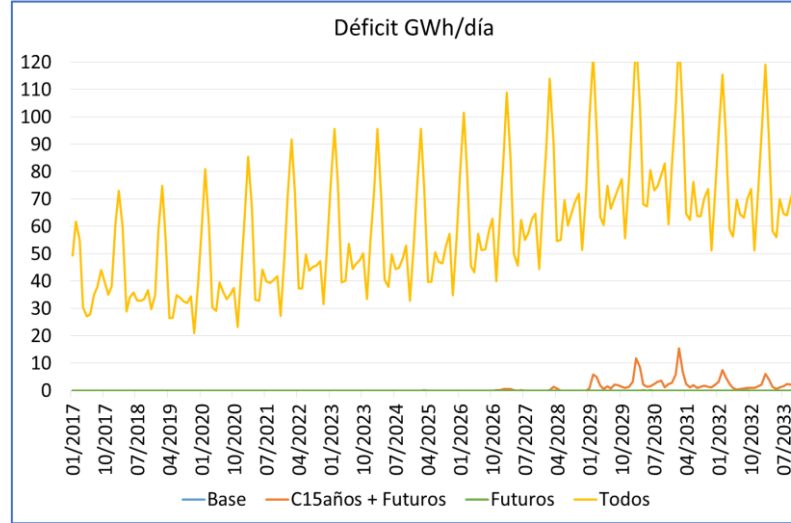
Proyectos futuros + Concesiones 15 años



Todos los proyectos hidroeléctricos

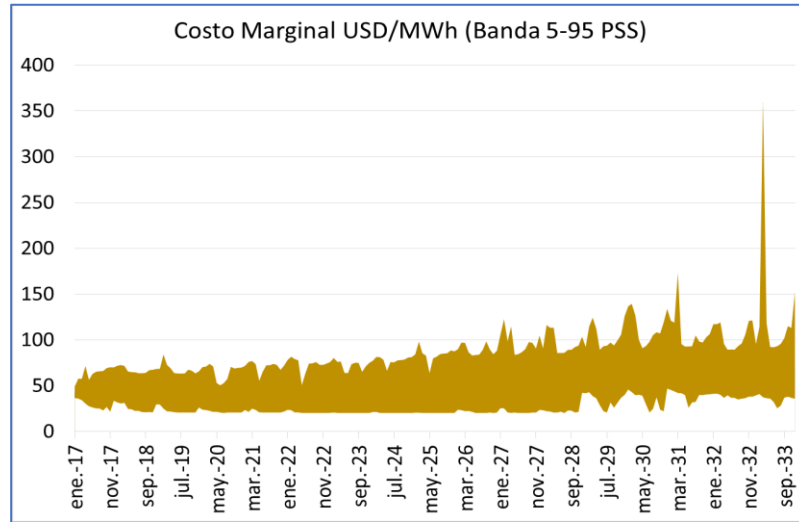


Comparación valores medios

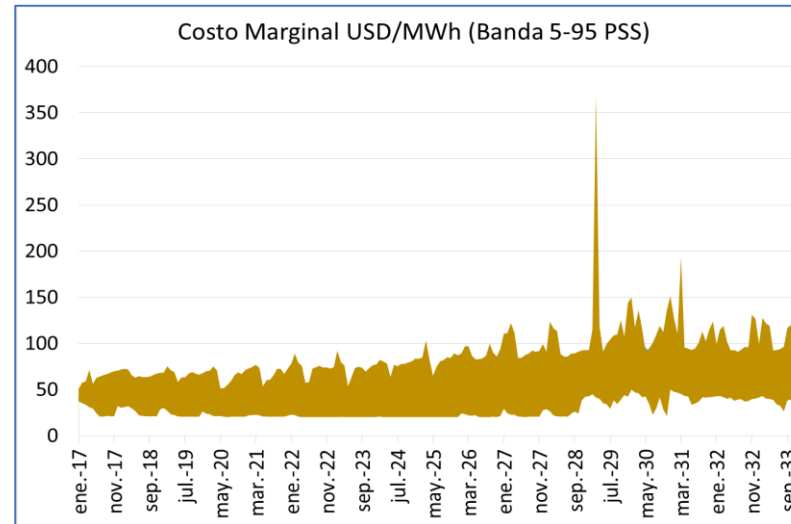


Resultados - Costo Marginal

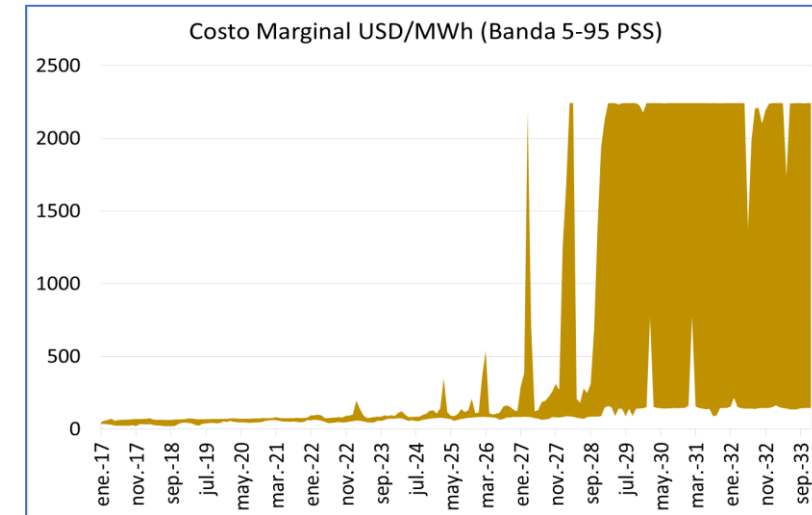
Sin guía



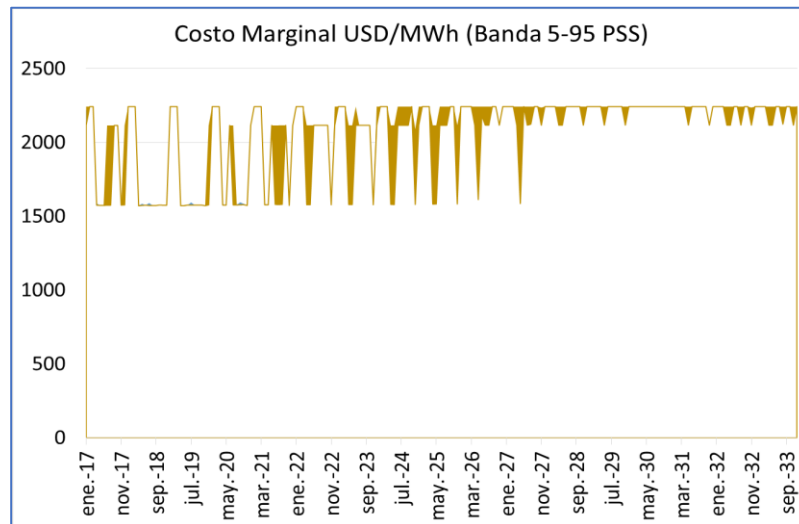
Proyectos futuros



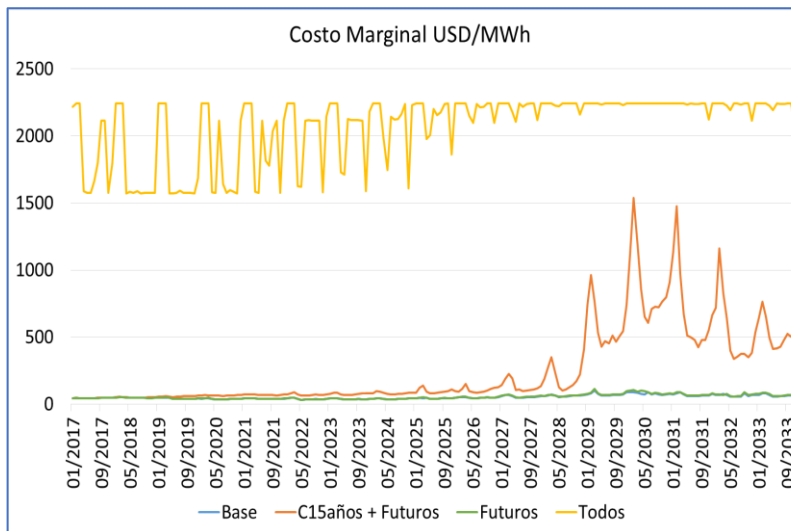
Proyectos futuros + Concesiones 15 años



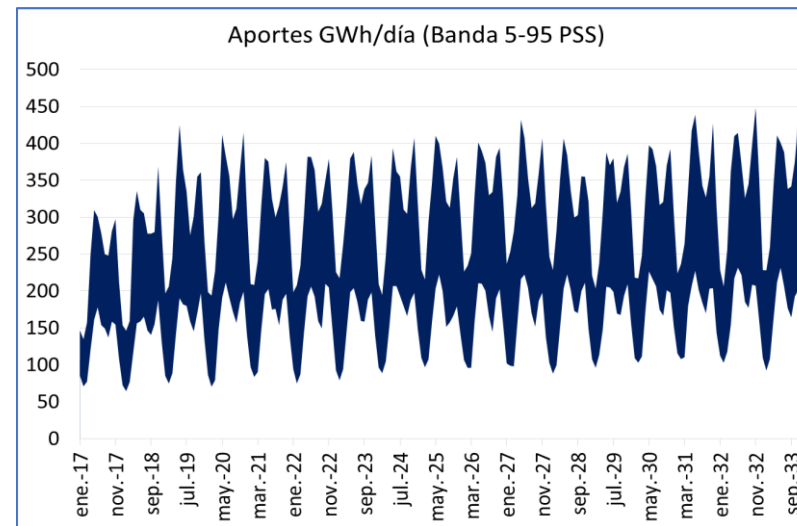
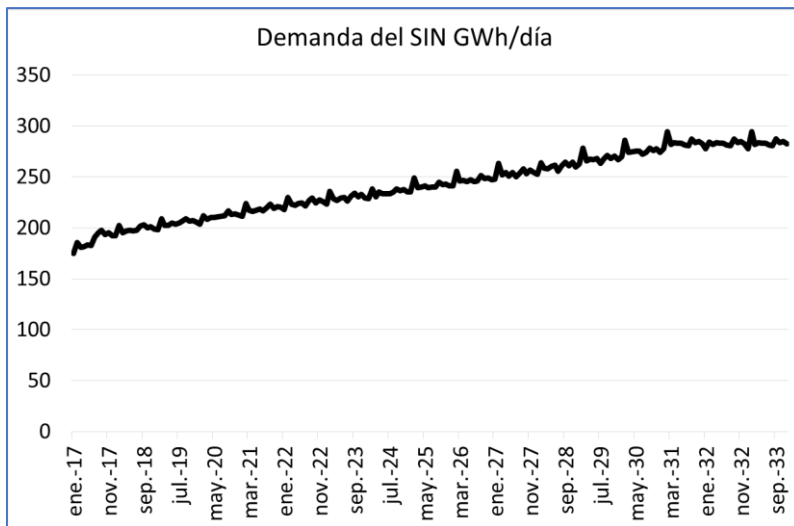
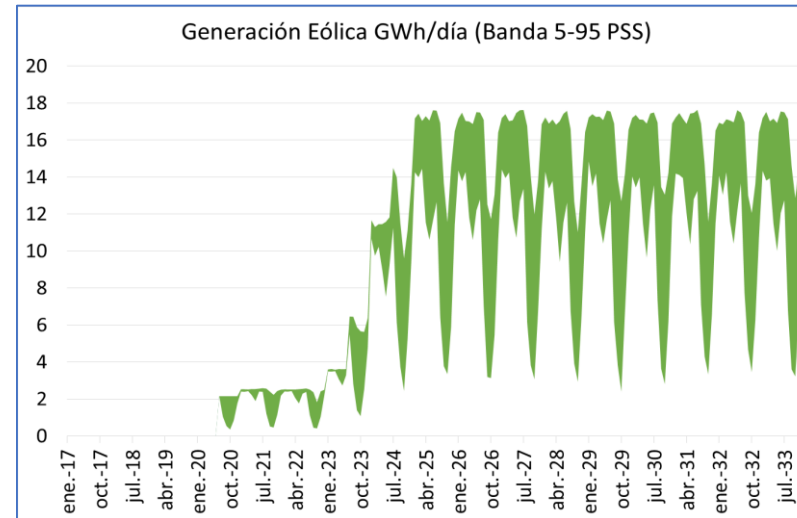
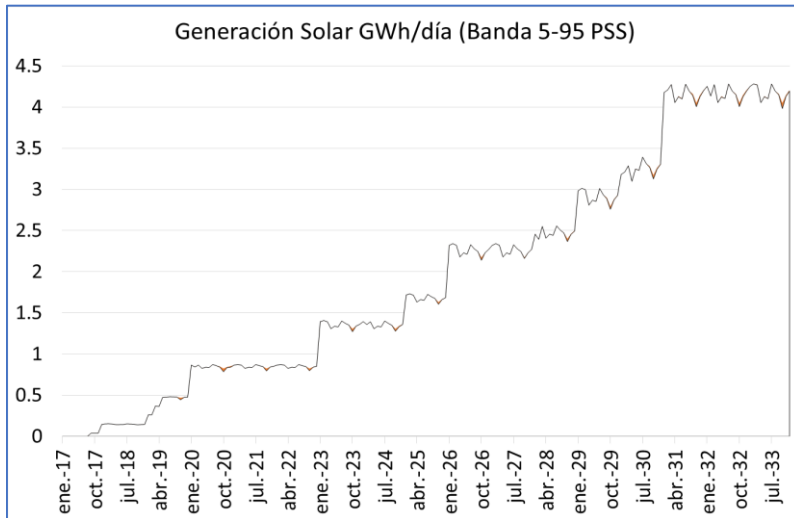
Todos los proyectos hidroeléctricos



Comparación valores medios



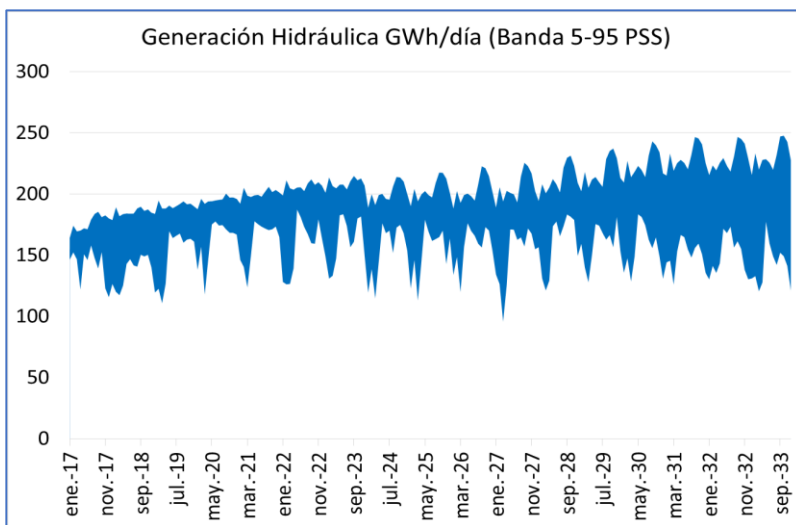
Aportes hídricos, Generación Solar, Eólica, Demanda



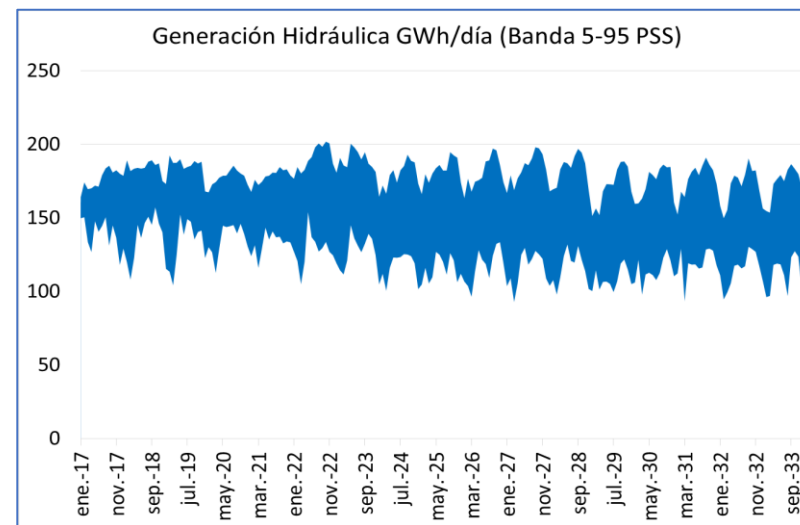
Resultados Escenario 3



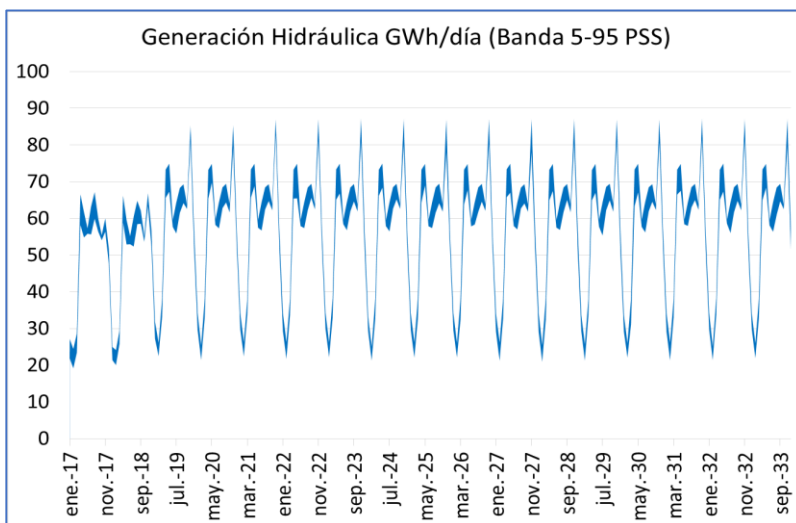
Sin guía



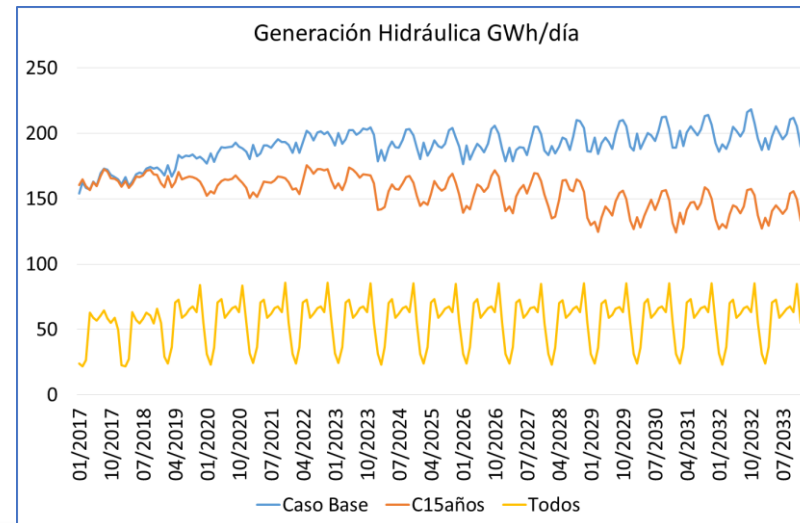
Proyectos futuros + Concesiones 15 años



Todos los proyectos hidroeléctricos

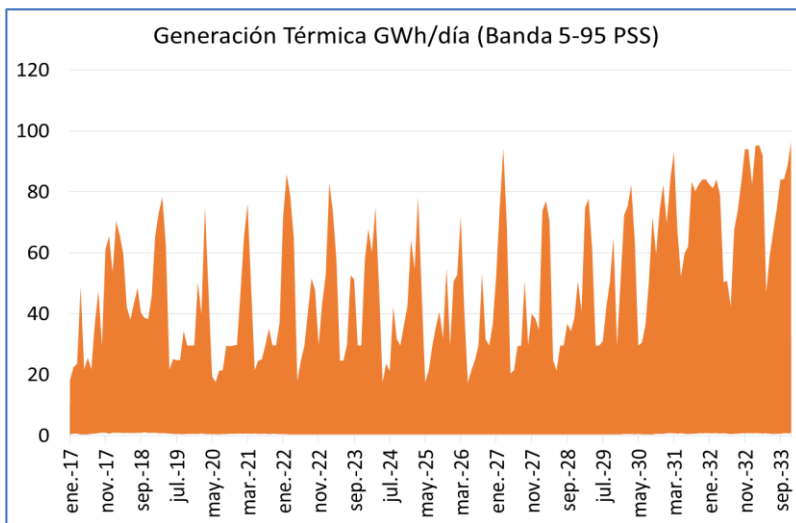


Comparación valores medios

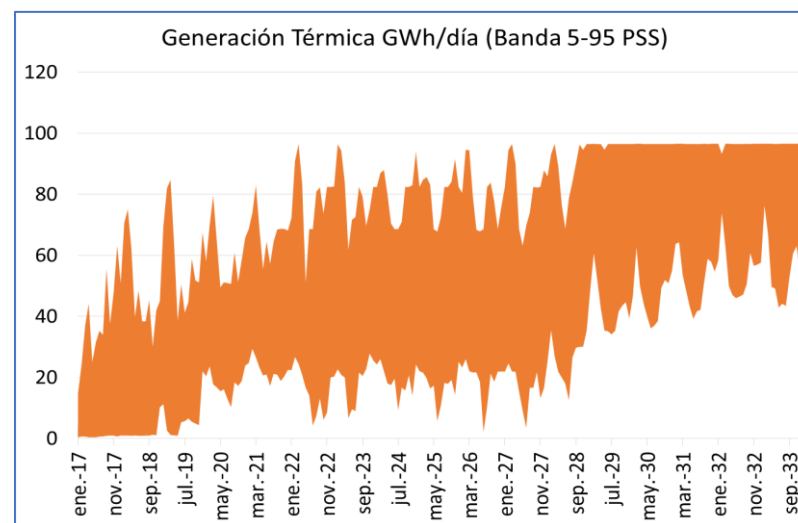


Resultados - Generación Térmica

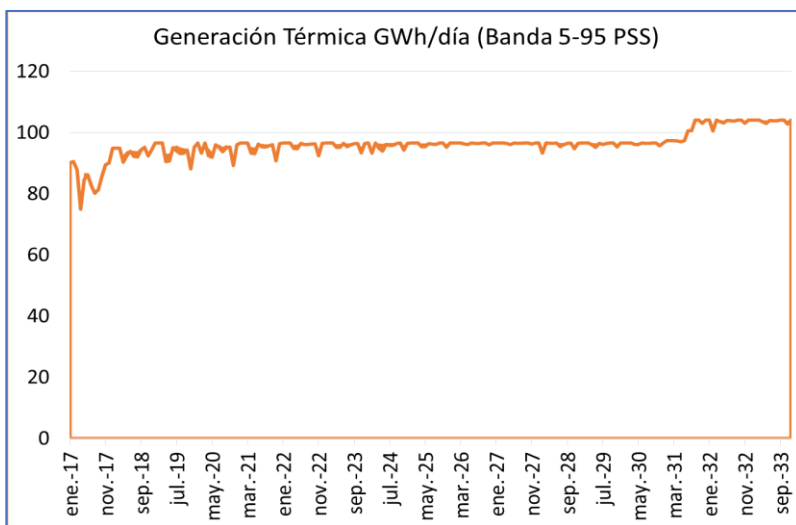
Sin guía



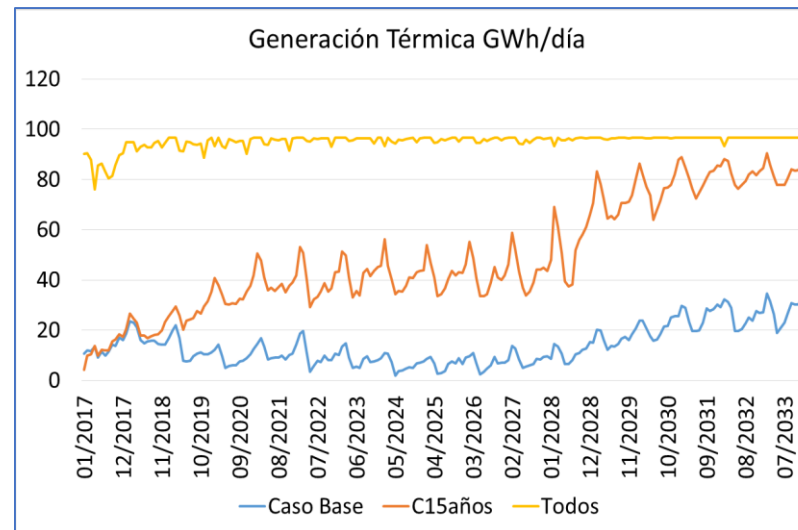
Proyectos futuros + Concesiones 15 años



Todos los proyectos hidroeléctricos

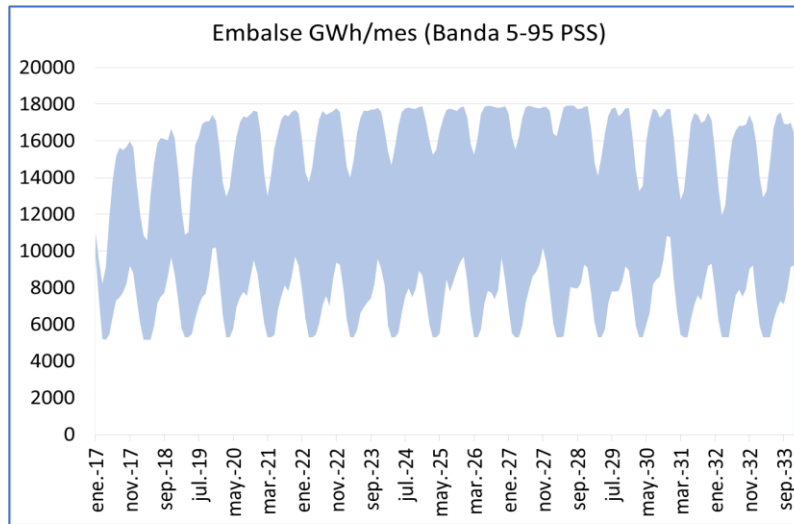


Comparación valores medios

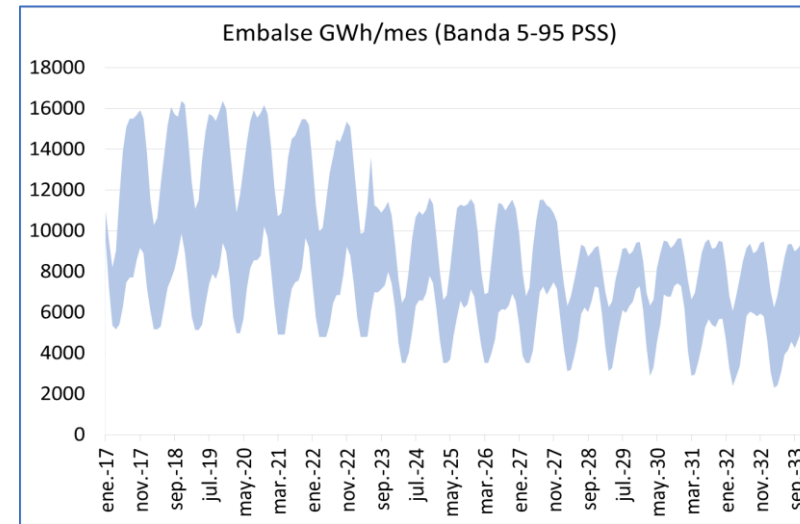


Resultados - Reserva del SIN

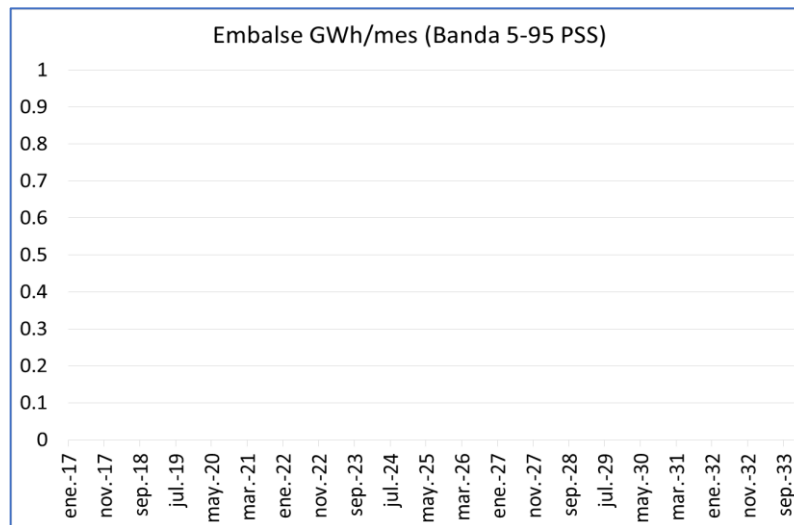
Sin guía



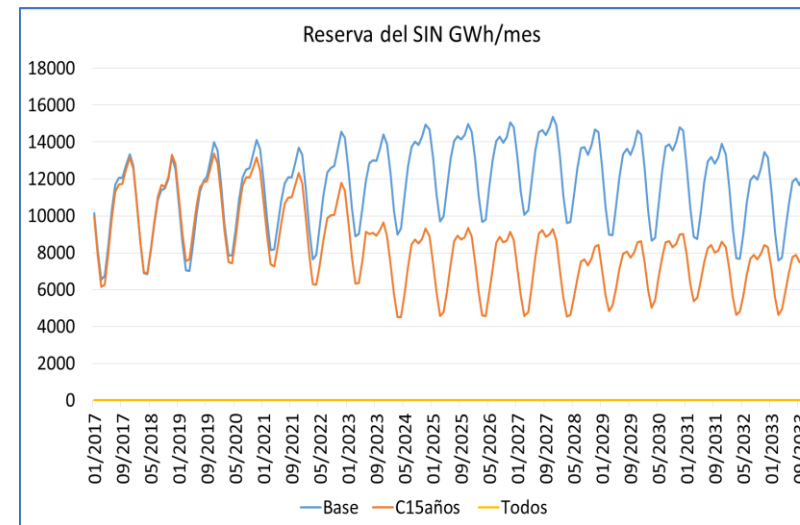
Proyectos futuros + Concesiones 15 años



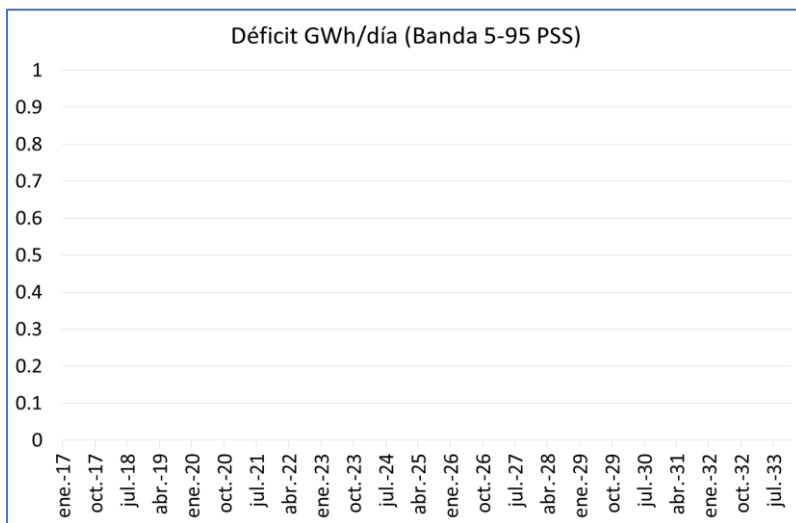
Todos los proyectos hidroeléctricos



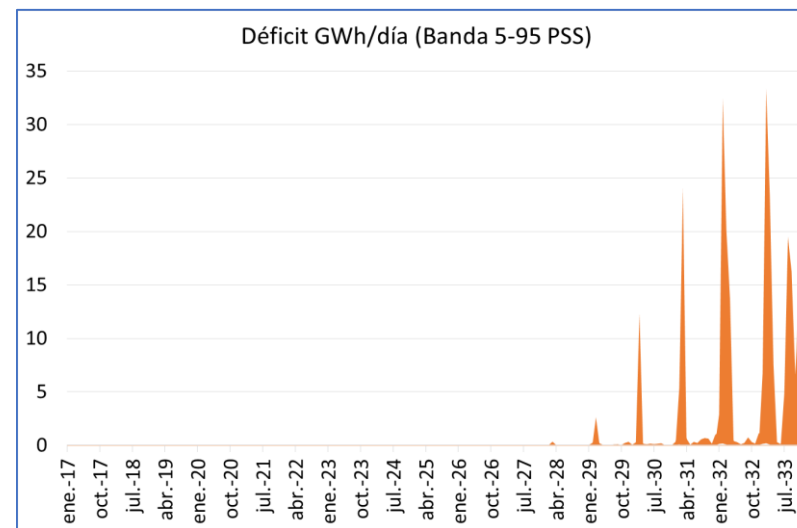
Comparación valores medios



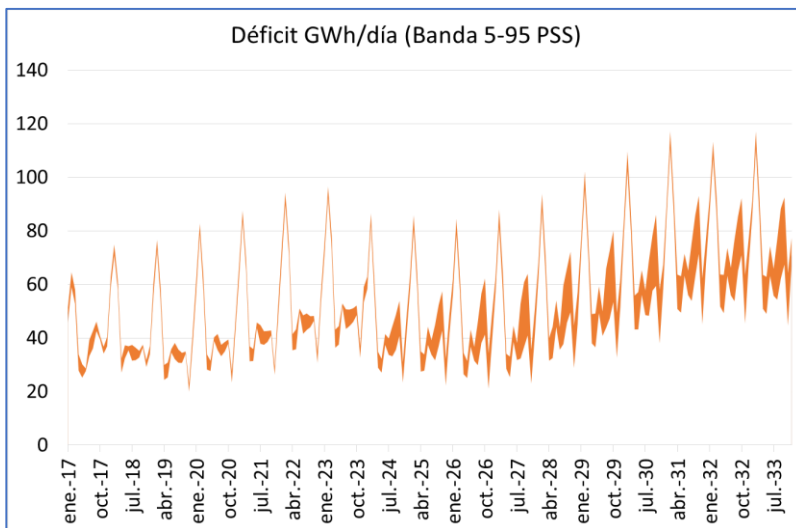
Sin guía



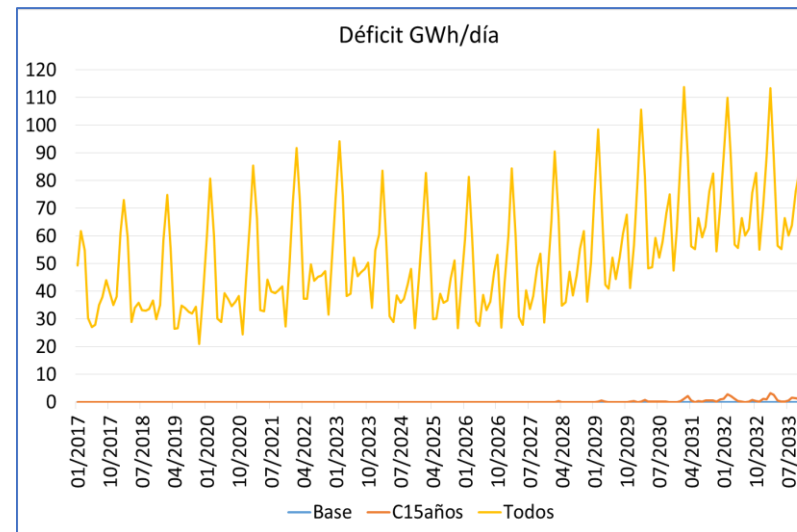
Proyectos futuros + Concesiones 15 años



Todos los proyectos hidroeléctricos

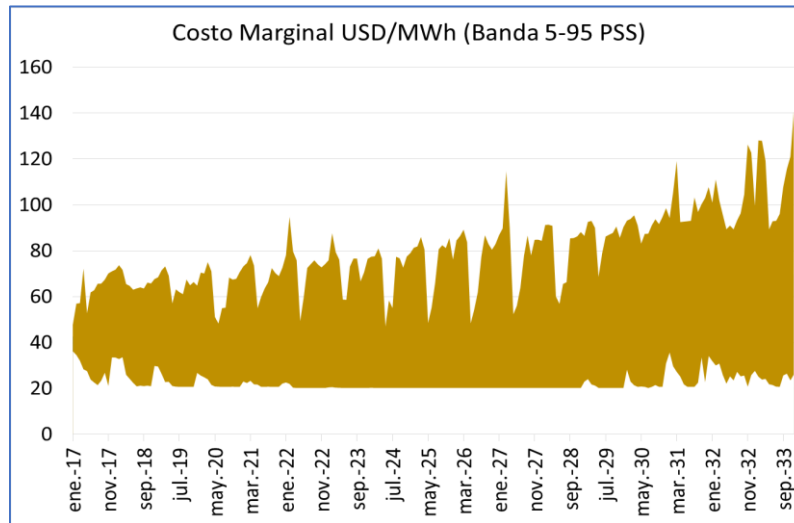


Comparación valores medios

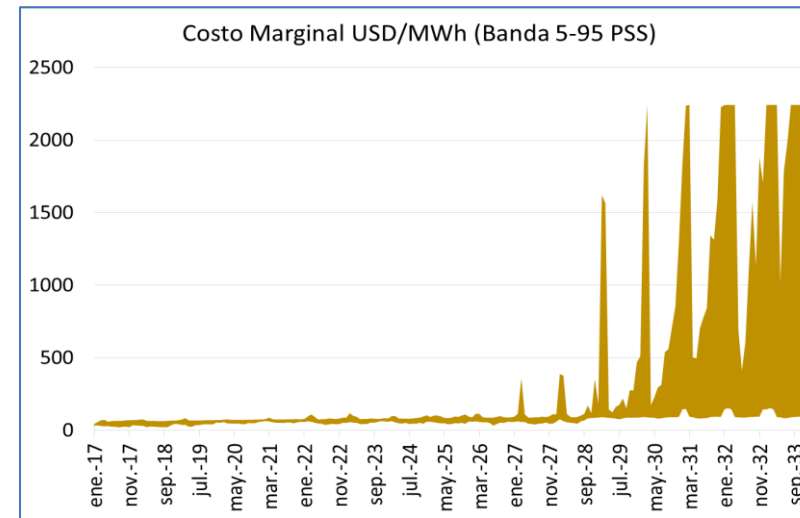


Resultados - Costo Marginal

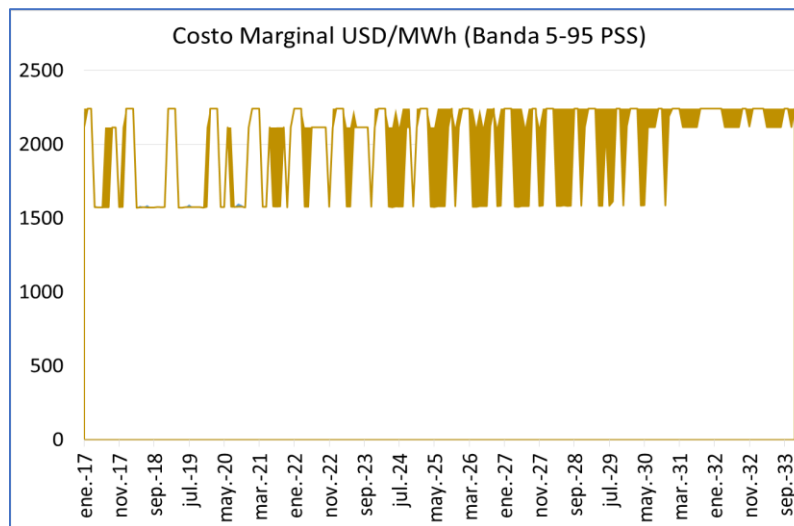
Sin guía



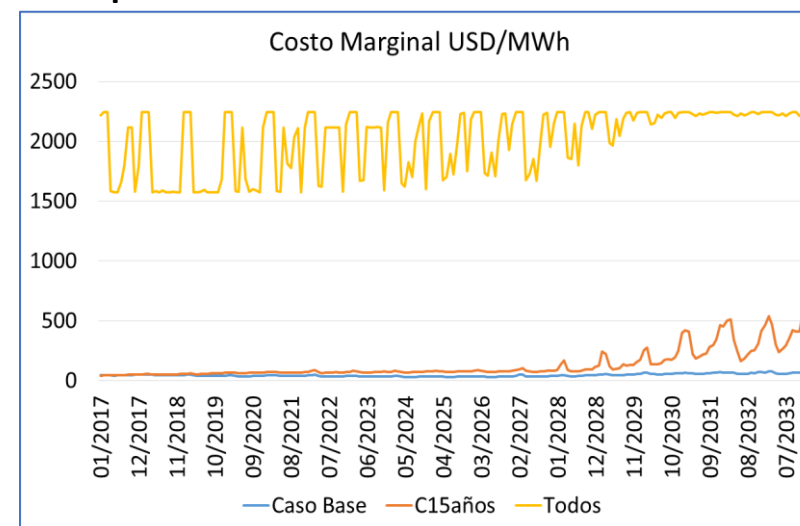
Proyectos futuros + Concesiones 15 años



Todos los proyectos hidroeléctricos



Comparación valores medios



Aportes hídricos, Generación Solar, Eólica, Demanda

