



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

**EVALUACIÓN DEL USO DE MODELOS  
PROBABILÍSTICOS EN LA ESTIMACIÓN DE LAS  
TRAYECTORIAS DE EMISIONES DE GASES DE  
EFECTO INVERNADERO EN CHILE**

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

**JAVIER IGNACIO MALLEA CARDEMIL**

PROFESOR GUÍA:

MANUEL ANDRÉS DIAZ ROMERO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

GERARDO DIAZ RODENAS

RAUL O'RYAN GALLARDO

SANTIAGO DE CHILE

2016

## **EVALUACIÓN DEL USO DE MODELOS PROBABILÍSTICOS EN LA ESTIMACIÓN DE LAS TRAYECTORIAS DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO EN CHILE**

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar el uso de modelos probabilísticos en la estimación de las trayectorias de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en Chile, para poder entregar una línea base de emisiones de GEI más clara y con ello, facilitar la toma de decisiones.

Las emisiones de GEI han incrementado año a año, y se ha hecho necesario tomar medidas de mitigación acorde a la situación de cada país. En particular, Chile se comprometió voluntariamente a reducir sus emisiones en un 30% para el año 2030<sup>1</sup>, es por esto que se necesitan estimaciones lo más confiables posibles de la trayectoria de emisiones de GEI para poder planificar las medidas de mitigación de emisiones a realizar. En Chile las emisiones los últimos años han crecido por sobre el 250% alcanzando las 64.3 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente el año 2010<sup>2</sup>.

Se realizaron proyecciones a través de escenarios determinísticos, realizadas por MAPS Chile<sup>3</sup>, las que tienen una diferencia de 32.5 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente. Es por esto que se busca evaluar un nuevo enfoque, y así tener una mejor calidad de resultados que entreguen con un grado de confianza, los niveles de emisiones para los años futuros. En particular este trabajo se centra en asignar distribuciones de probabilidades a variables relevantes en los modelos utilizados, para capturar su variabilidad. Se trabajó directamente con los sectores Industria y Minería, y CPR (comercial, público y residencial). La demanda eléctrica de estos sectores permite trabajar indirectamente la incertidumbre presente en el sector generación eléctrica, al reducir la incertidumbre en su insumo, así como la propagación de la misma.

Se utilizó el complemento de Excel llamado Crystal Ball, que permite simular modelos probabilísticos, a través de Montecarlo. Con las variables relevantes identificadas, y su distribución asignada se obtuvo las distribuciones anuales para las emisiones de GEI y demanda eléctrica. Llama la atención que los escenarios bajo y medio no superen el 75% de confianza, ya que se considera como un nivel bajo de confianza que no permite tomar acciones al tomador de decisiones. Estos resultados permiten concluir la importancia de este nuevo enfoque, que permite analizar valores que lo determinístico no cubre, y entregar resultados de mayor confianza. Esto también ayuda a ver otro problema presente, ya que aclara si el escenario bajo es realmente el más bajo posible, y análogamente con el escenario alto. Sólo los escenarios altos, exigiendo un 95% de confianza, son capaces de entregar información confiable para tomar decisiones.

Además, se evaluó la importancia de las variables en los resultados obtenidos, obteniendo que la ley de concentrado de cobre y la población son las más importantes para Industria y Minería.

---

<sup>1</sup> <http://www.emol.com/noticias/Nacional/2015/09/28/751999/Chile-compromete-reduccion-de-un-30-de-emision-de-gases-de-efecto-invernadero-al-ano-2030.html>

<sup>2</sup> <http://generadoras.cl/wp-content/uploads/Estudio-emisiones-CO2-en-Chile.pdf>

<sup>3</sup> [http://portal.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2014/12/ResultadosdeFase2\\_MAPSChile.pdf](http://portal.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2014/12/ResultadosdeFase2_MAPSChile.pdf)

## DEDICATORIA

A mi madre. Si bien no me pudo acompañar todo el camino, sigue siendo la más importante para mí.

## AGRADECIMIENTOS

A mi familia, Papá, Rodrigo, Lore, tía Claudia, tío Francisco, Seba, Juan, pero en especial a mi madre, que me apoyó en los años más duros de la carrera, al comenzar la universidad, y me apoyó cada vez que me iba mal, o que por la razón que fuera, no estaba bien. No sabes cuánto te he extrañado estos últimos años.

A Gabriel y toda su familia, Tío Jorge, Tía Carmen, Gera, Jorge. Me aguantaron, tanto en su casa en Mirasol, desde navidad hasta pasado año nuevo, y en su departamento, el resto del tiempo, la mayoría de los días, me quedara trabajando toda la noche, un rato, el tiempo que fuese, siempre dándome apoyo. Sin ellos no hubiera sido capaz de terminar mi trabajo. Son una de mis escasas segundas familias.

A la Selección de Natación, de la cual tuve el orgullo de ser capitán el año pasado. Estuvieron ahí en los momentos más duros de mi vida, sin ellos no podría haber salido adelante. Los quiero un montón y me da una pena enorme dejar de ser parte de ellos, pero algún día tenía que salir de la universidad.

Al Memo, que me aguantó días y noches para trabajar en la memoria, aunque no siempre fue efectivo, pero siempre fue con las mejores de las intenciones ajaj.

A mis amigos de la universidad. El Nico, a pesar de la distancia, siempre preocupado de cómo iba con mis avances, ofreciendo su ayuda en todo momento. La Caro, que me escuchó cada vez tuve problemas y su opinión siempre tuvo un gran impacto en mí, probablemente mayor de lo que ella esperaba.

A la tía Katy, preocupada en todo momento por mí, estuvo ahí en los momentos más duros de los últimos años, y me alimentó toda mi carrera ajaja. La quiero mucho.

A la familia Berdeja Zamalloa, más de 6 años que los conozco y estoy muy agradecido por haberlos conocido. Muchas gracias por todo.

A los profesores que guiaron en mi trabajo de título. Me ayudaron con todos mis problemas personales y siempre me ofrecieron su apoyo.

Y a todos que de alguna forma u otra aportaron durante toda mi carrera, Dani, Chillán, Andrea, Lais, la Naty, Chanchi, y muchos más. Quizás no los nombré a todos, pero saben quiénes son y les estoy infinitamente agradecido.

## TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Motivación.....	1
1.2	Objetivos.....	2
2	ANTECEDENTES GENERALES.....	3
3	METODOLOGIA.....	8
4	MARCO CONCEPTUAL.....	9
5	EL MODELO DETERMINÍSTICO.....	12
5.1	Modelo MAPS.....	12
5.1.1	Supuestos Clave.....	12
5.1.2	Sector Industria y Minería.....	12
5.1.3	Sector Comercial, Público y Residencial.....	13
5.1.4	Sector generación eléctrica.....	14
5.2	Resultados publicados.....	14
5.2.1	Sector Industria y Minería.....	15
5.2.2	Sector Comercial, Público y Residencial.....	15
5.3	Modelo determinístico replicado.....	16
5.3.1	Justificación.....	16
5.3.2	Descripción del modelo.....	17
5.3.3	Validación del modelo.....	23
5.3.4	Resultados.....	25
6	INCORPORANDO INCERTIDUMBRE: EL MODELO PROBABILÍSTICO.....	29
6.1	¿POR QUÉ SE INCORPORA INCERTIDUMBRE?.....	29
6.2	VARIABLES CON INCERTIDUMBRE.....	29
6.3	¿CÓMO INCORPORAR LA INCERTIDUMBRE?.....	32
6.4	MODELO PROBABILÍSTICO.....	34

6.4.1	Asignación de distribución a las variables .....	34
7	RESULTADOS MODELO PROBABILÍSTICO .....	37
7.1.1	Resultados Industria y Minería.....	37
7.1.2	Resultados CPR .....	40
8	COMPARACIÓN ENTRE MODELOS DETERMINÍSTICO Y PROBABILÍSTICO .....	44
8.1	COMPARACIÓN DE RESULTADOS.....	44
8.1.1	Sector Industria y Minería .....	44
8.1.2	Sector CPR .....	45
8.2	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	46
8.3	ANÁLISIS DE IMPORTANCIA .....	47
8.3.1	Industria y Minería .....	47
8.3.2	CPR.....	48
9	CONCLUSIONES.....	49
10	BIBLIOGRAFÍA.....	51
11	ANEXO Y APÉNDICE .....	52
11.1	ANEXO A: UNIDADES DE MEDICIÓN PARA GEI.....	52
11.2	ANEXO B: Detalle de cálculo de emisiones de GEI y de demanda eléctrica de sector minería	52
11.3	ANEXO C: Detalle de cálculo de emisiones de GEI y de demanda eléctrica de sector CPR	54
11.4	ANEXO D: Serie de crecimiento de PIB (millones de pesos) utilizada como base. Referencia del año 2008. ....	56
11.5	ANEXO E: Capacidad máxima anual de producción de cobre y vectores de probabilidad para cada clasificación de la producción esperada.....	57
11.6	ANEXO F: Gráficos con los resultados de emisiones y demanda eléctrica para los años 2015, 2020 y 2025, del modelo probabilístico de los sectores de Industria y Minería, y CPR.	57
11.7	ANEXO G: Gráficos de análisis de importancia .....	65

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Variación de emisiones de países desarrollados y países en desarrollo. ....	5
Tabla 2 Emisiones del sector Industria y Minería .....	15
Tabla 3 Emisiones del sector CPR .....	16
Tabla 4 Modelo econométrico del sector Minas Varias .....	19
Tabla 5 Modelo econométrico del sector Minas Varias .....	20
Tabla 6 Validación del modelo replicado sector Industria y Minería, emisiones de GEI .....	23
Tabla 7 Validación del modelo replicado sector Industria y Minería, demanda eléctrica .....	24
Tabla 8 Validación del modelo replicado sector CPR, emisiones de GEI .....	25
Tabla 9 Validación del modelo replicado sector CPR, demanda eléctrica.....	25
Tabla 10 Emisiones de GEI: Modelo determinístico replicado, industria y minería .....	25
Tabla 11 Demanda eléctrica: Modelo determinístico replicado, industria y minería.....	26
Tabla 12 Emisiones de GEI: Modelo determinístico replicado, sector CPR.....	27
Tabla 13 Demanda eléctrica: Modelo determinístico replicado, CPR .....	28
Tabla 14 Resumen de los tipos de cantidad con su respectivo tratamiento de incertidumbre .....	30
Tabla 15 Cumplimiento de criterios por parte de las variables .....	31
Tabla 16 Análisis de expertos para el crecimiento del PIB .....	32
Tabla 17 Análisis de expertos para la población .....	33
Tabla 18 Intervalos de confianza de emisiones GEI 2030 Industria y Minería .....	38
Tabla 19 Evolución de los estadísticos de las emisiones de GEI .....	38
Tabla 20 Intervalos de confianza demanda eléctrica 2030 Industria y Minería.....	40
Tabla 21 Evolución de los estadísticos de demanda eléctrica Industria y Minería .....	40
Tabla 22 Intervalos de confianza de emisiones GEI 2030 CPR.....	41
Tabla 23 Evolución de los estadísticos de las emisiones de GEI en CPR.....	41
Tabla 24 Intervalos de confianza demanda eléctrica 2030 CPR .....	43
Tabla 25 Evolución de los estadísticos de demanda eléctrica, CPR .....	43

Tabla 26 Resultados determinísticos para el 2030 de emisiones en Industria y Minería.....	44
Tabla 27 Resultados determinísticos para el 2030 de demanda eléctrica en Industria y Minería.	44
Tabla 28 Resultados determinísticos para el 2030 de emisiones, CPR .....	45
Tabla 29 Resultados determinísticos para el 2030 de demanda eléctrica, CPR.....	45
Tabla 30 Valores del análisis de importancia de emisiones de GEI para Industria y Minería.....	47
Tabla 31 Valores del análisis de importancia de demanda eléctrica para Industria y Minería .....	48

## INDICE DE ILUSTRACIONES

Gráfico 1 Evolución de emisiones en el mundo.....	4
Gráfico 2 Evolución de emisiones en Chile.....	5
Gráfico 3 Resultados de Línea Base 2013.....	6
Gráfico 4 Emisiones proyectadas sector Industria y Minería.....	15
Gráfico 5 Emisiones proyectadas sector CPR.....	16
Gráfico 6 Flujo de Procesos.....	18
Gráfico 7 Proyección de emisiones de GEI: Modelo determinístico replicado, industria y minería.....	26
Gráfico 8 Proyección de demanda eléctrica: Modelo determinístico replicado, Industria y Minería.....	26
Gráfico 9 Proyección de emisiones de GEI: Modelo determinístico replicado, CPR.....	28
Gráfico 10 Proyección de demanda eléctrica: Modelo determinístico replicado, CPR.....	28
Gráfico 11 Ajuste de distribución logística a data histórica del PIB.....	35
Gráfico 12 Resultado Emisiones GEI 2030 Industria y Minería.....	38
Gráfico 13 Resultado Demanda Eléctrica 2030 Industria y Minería.....	39
Gráfico 14 Resultado Emisiones GEI 2030 CPR.....	41
Gráfico 15 Resultado Demanda Eléctrica 2030 CPR.....	42

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Motivación

Debido al aumento insostenible de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en el mundo, se ha generado preocupación por el calentamiento global, sus cambios climáticos y la necesidad de llevar a cabo medidas para combatirlo. Esto gatilló que diversos países se comprometieran a reducir sus emisiones a futuro, entre ellos, Chile.

Es por esto que en Chile, a través de MAPS Chile, se han realizado estimaciones de emisiones de GEI utilizando modelos determinísticos, donde la principal variables es el PIB del país. El problema de utilizar escenarios determinísticos es que no se captura de manera efectiva la incertidumbre de las variables, dado que éstas pueden tomar valores a futuro que no se especifican en el modelo. Además, los escenarios extremos dan valores lejanos; por ejemplo para el año 2030, las emisiones del escenario bajo son de 137.5 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente (MM tCO<sub>2</sub>eq) mientras que el alto alcanza los 170 MMtCO<sub>2</sub>eq. Dependiendo del nivel de emisiones de GEI es que se toman medidas de mitigación, las que difieren en alcance y costo. A raíz de esto interesa buscar una nueva metodología de estimación de la trayectoria de GEI, entregando más confianza y menos variabilidad en sus resultados futuros.

Se quiere analizar la incertidumbre de estas variables a través de modelos probabilísticos, donde se incorporan distribuciones de probabilidades a las variables claves. Luego de haber identificado las variables claves, y haberles asignado su distribución de probabilidad respectiva, se simula con el método de Montecarlo, para obtener diferentes probabilidades de niveles de emisión de GEI en los años futuros.

En particular, se analizarán 2 de los 7 sectores con los que trabaja MAPS, sector Industria y Minería, y sector Comercial, público y residencial. En primer lugar se replicarán los modelos utilizados, para luego identificar las variables claves, y en caso de poder asignarles una distribución de probabilidad, analizar su efecto en los resultados.

Dado este escenario, este trabajo tiene como objetivo general evaluar el uso de los modelos probabilísticos en la estimación de gases de efecto invernadero en Chile. Para lograr esto, se tendrá que determinar la distribución de variables relevantes para estimar las emisiones de GEI, y desarrollar un modelo probabilístico que sea capaz de capturar y propagar esta distinta forma de medir la incertidumbre futura.

Así se podrán comparar los resultados obtenidos de los distintos modelos, determinístico y probabilística, para poder concluir el real aporte de este enfoque diferente para estimar las emisiones de GEI. Aporte que impacta directamente en las medidas de mitigación de emisiones que se van a tomar, dado que éstas varían dependiendo del porcentaje que se espera reducir, teniendo distinto costo para el tomador de decisiones.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo general

Evaluar el uso de modelos probabilísticos en la estimación de las trayectorias de emisiones de gases de efecto invernadero en Chile, para poder entregar una línea base de emisiones de GEI más clara, y con ello, facilitar la toma de decisiones.

### 1.2.2 Objetivos específicos

1. Determinar variables relevantes, y su respectiva distribución de probabilidades, en la estimación de la trayectoria de emisiones de GEI.
2. Desarrollar un modelo probabilístico que integre las variables explicativas para la estimación de GEI.
3. Evaluar el poder explicativo del modelo probabilístico sobre el modelo determinístico.
4. Identificar las variables que aportan mayor incertidumbre a la estimación de GEI.

## 2 ANTECEDENTES GENERALES

El efecto invernadero es un fenómeno producido en consecuencia de la retención del calor emitido por la Tierra, en la atmósfera. Este calor queda atrapado debido a una serie de gases presentes en la atmósfera. Estos gases son el vapor de agua, dióxido de carbono, metano, óxido de nitrógeno, ozono y clorofluorocarbonos<sup>4</sup>. Al quedar atrapado este calor en los gases mencionados, se produce un efecto muy similar al que sucede en los invernaderos, por ello se denomina a este suceso, “efecto invernadero”. El efecto invernadero es la principal causa del calentamiento global.

En el año 2012, los principales contribuyentes a las emisiones totales fueron:<sup>5</sup>

- CO<sub>2</sub>: 81,3%
- CH<sub>4</sub>: 10,9%
- N<sub>2</sub>O: 6,0%
- Otros: <2%

La preocupación por el calentamiento global, sus cambios climáticos y la necesidad de llevar a cabo medidas para combatirlo, fue lo que gatilló que en 1992 se realizara la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC)<sup>6</sup>, a la que Chile se adhirió en 1994<sup>7</sup>. Uno de los puntos referidos en esta convención, fue con respecto a los gases de efecto invernadero, GEI, donde se debía reportar periódicamente los inventarios nacionales de GEI.

Bajo la CMNUCC, en el año 2005, se firmó el Protocolo de Kyoto, el cual incluye compromisos con respecto a las emisiones de GEI. Chile, al no ser un país desarrollado, no posee compromisos de reducción de emisiones de GEI dado este protocolo. En el 2009, las Partes involucradas en el CMNUCC llevan a cabo el Acuerdo de Copenhague, que establece 2 puntos importantes:

- Los países desarrollados inscribieran compromisos o acciones de mitigación a ser implementadas al 2020.
- Países en desarrollo inscribieran acciones nacionalmente apropiadas de mitigación, a ser implementadas el 2020.

En respuesta al Acuerdo de Copenhague, en el año 2010, Chile plantea su compromiso voluntario, donde se promete disminuir en un 20% su trayectoria creciente de emisiones en el 2020, proyectadas desde 2007.

Las emisiones de GEI han estado en constante crecimiento en los últimos años. Es más, entre los años 1990 y 2012, centrándose solo en la energía, ha habido un incremento de un 51,3%, llegando a una cantidad de 31.734,3 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente (unidad de medida explicada en marco teórico). Esta evolución se puede apreciar gráficamente en el gráfico 1.

---

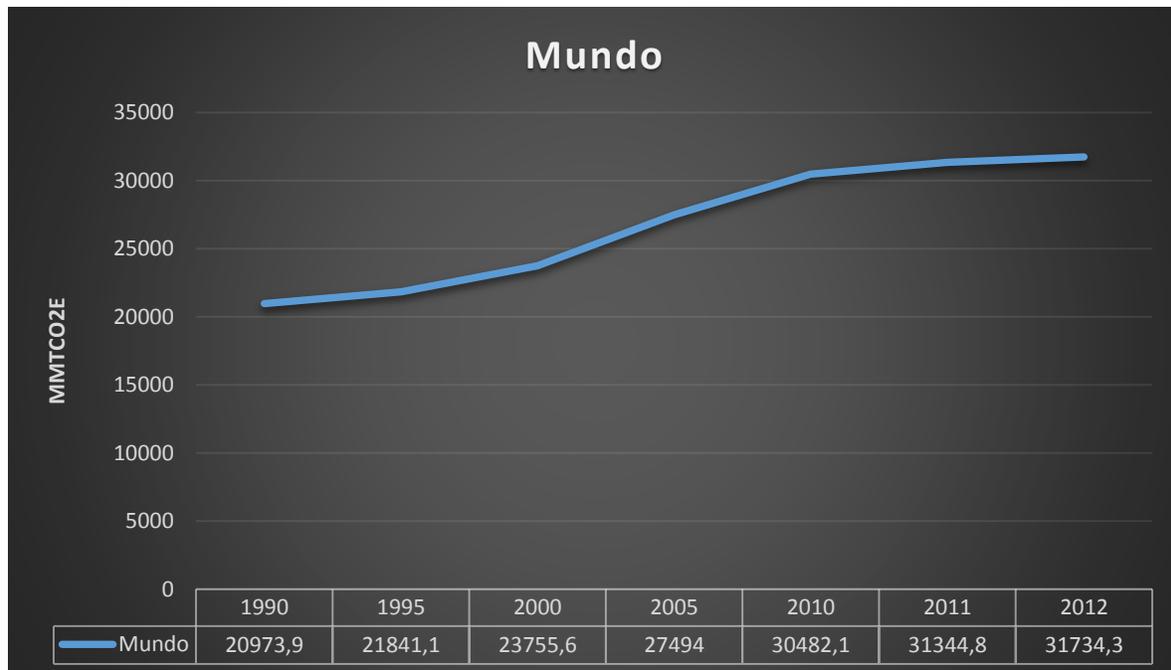
<sup>4</sup> <http://cambioclimaticoglobal.com/gasesinv>

<sup>5</sup> <http://unfccc.int/resource/docs/2014/sbi/spa/20s.pdf>

<sup>6</sup> <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf>

<sup>7</sup> <http://www.mma.gob.cl/1304/w3-article-54740.html>

Gráfico 1 Evolución de emisiones en el mundo.



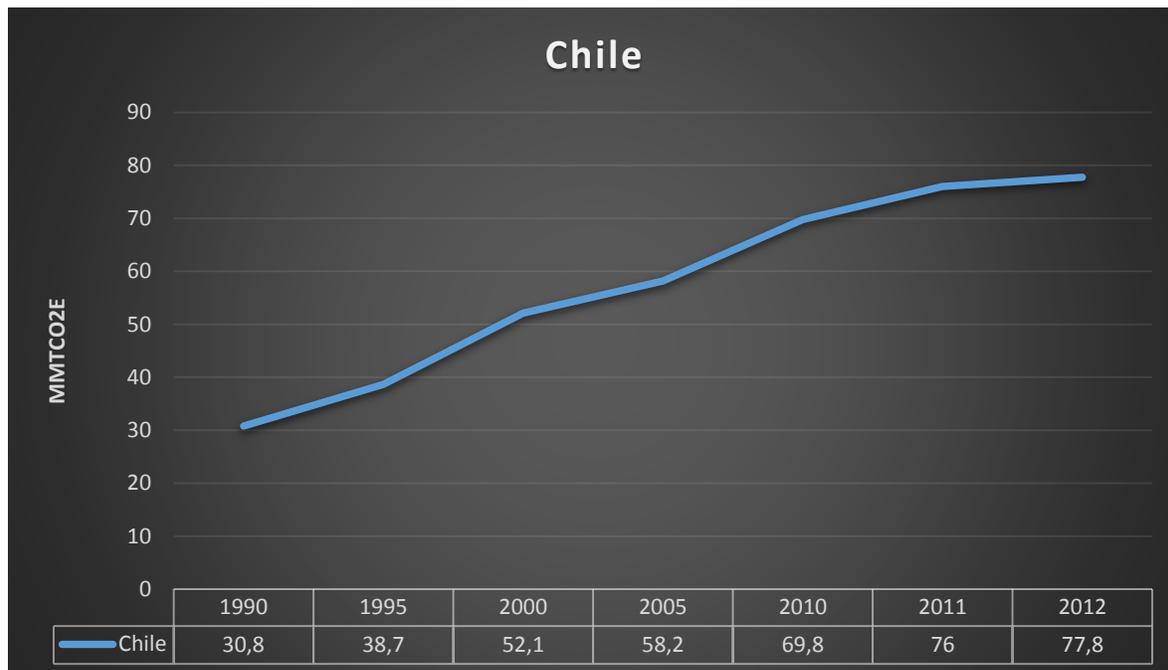
Fuente: Elaboración Propia a partir de datos de la Agencia Internacional de Energía.

A nivel nacional, se ha mantenido una tendencia creciente con respecto a las emisiones de GEI, centrándose en la energía. Es más, esta tendencia supera el promedio de crecimiento mundial, alcanzando 152,4% de aumento entre los años 1990 y 2012. Para el 2012, se alcanzó una cantidad de emisiones de 77,8 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente. Esta evolución se puede apreciar gráficamente en el gráfico 2.

Existen diferencias a la hora de hacer estimaciones de emisiones de GEI entre países desarrollados con países en vías de desarrollo. Mientras que para los países desarrollados el cálculo de la línea base es simple - emisiones de CO<sub>2</sub> de una fecha pasada - para los países en vías de desarrollo es un asunto mucho más complejo. Al ser a fecha futura, aparecen dos problemas en el horizonte:

- Definición: ¿Qué políticas actuales están incluidas?
- Incertidumbre: ¿Cómo evolucionarán las emisiones de CO<sub>2</sub> en el futuro, y cómo las políticas actuales las afectarán?

Gráfico 2 Evolución de emisiones en Chile.



Fuente: Elaboración Propia a partir de datos de la Agencia Internacional de Energía.

Ésta situación se ve reflejada en la variación de emisiones de GEI de países desarrollados y países en vías de desarrollo. Mientras que en el primer grupo las emisiones se mantienen relativamente constante, y por lo mismo, a través de medidas de mitigación de emisiones pueden reducirlas, el segundo grupo tiene altos incrementos de emisiones en los últimos años. En la tabla 1, se muestran ejemplos de países desarrollados y en desarrollo junto a su variación de emisiones entre los años 1990 y 2012.

Tabla 1 Variación de emisiones de países desarrollados y países en desarrollo.

<b>País Desarrollado</b>	<b>Variación 90-12</b>	<b>País en desarrollo</b>	<b>Variación 90-12</b>
<b>Francia</b>	-5.4%	<b>India</b>	236.6%
<b>Estados Unidos</b>	4.2%	<b>China</b>	262.2%
<b>Alemania</b>	-20.5%		

Fuente: Elaboración Propia a partir de datos de la Agencia Internacional de Energía.

Hoy en día se realizan, en Chile y el mundo, estimaciones de emisiones de GEI utilizando modelos determinísticos. Estas estimaciones, en Chile, son llevadas a cabo por el proyecto MAPS Chile, entre otros.

MAPS Chile es un proyecto del Estado, para hacer frente al cambio climático y avanzar hacia un desarrollo bajo en carbono. Genera información a partir de investigaciones sobre las posibles trayectorias de emisiones de GEI en Chile. Con esto, propone y evalúa medidas de mitigación considerando las prioridades del desarrollo del país.

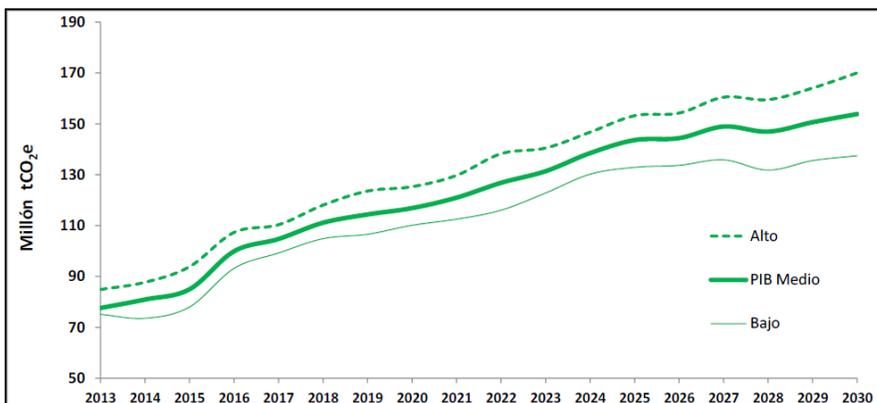
Estudia las emisiones de GEI en 7 sectores. En cada uno, se distinguen escenarios, donde la variación más importante es de la proyección del PIB. Estos escenarios incluyen los efectos de variables exógenas al modelo definido por ellos, de variables como la tasa del crecimiento del PIB y del tipo de cambio. Los sectores estudiados son:

- Generación eléctrica y transporte electricidad.
- Transporte y urbanismo.
- Industria y Minería.
- Comercial, público y residencial.
- Agropecuario y cambio de uso de suelo.
- Forestal y cambio de uso de suelo.
- Residuos antrópicos.

Los escenarios resultan ser económicamente distintos, dado que se sensibilizan principalmente variables socioeconómicas. Esto implica que se genera una dificultad a la hora de tomar decisiones, ya que no se puede establecer con claridad cuál de ellos sucederá.

En estos escenarios, es imposible capturar la totalidad de la incertidumbre presente en algunas variables, lo que complica el establecer una línea base de emisiones de GEI confiable, haciendo difícil la labor para los diseñadores de políticas, el comprometerse con una línea base específica. En este contexto es común considerar casos extremos, generando escenarios con un amplio rango de variación en resultados. Este es precisamente el enfoque usado por MAPS. Esto genera que exista un amplio rango entre los escenarios proyectados, como se puede observar en el gráfico 3, donde en el año 2013 la diferencia entre los escenarios extremos es de 9,8 MMTCO<sub>2</sub>eq, mientras que para el año 2030 la diferencia asciende a 32,5 MMTCO<sub>2</sub>eq. Estos resultados se obtienen de los resultados de fase 2.

Gráfico 3 Resultados de Línea Base 2013



Fuente: Resultados MAPS fase 2.

Se observa claramente que para el periodo de estudio, el rango es muy amplio. Es por esto que se propone llevar a cabo análisis probabilísticos, para tener resultados más confiables con un manejo de la incertidumbre. Este amplio intervalo hace difícil el establecer una base definitiva y confiable para el país, por lo que se busca llegar a un resultado donde se pueda decir que con cierto porcentaje de confianza, ocurrirá tal escenario, y poder tomar decisiones al respecto con una mejor justificación.

Por otro lado, también existe una repercusión económica. Dadas las estimaciones de las emisiones de GEI, se llevan a cabo diferentes medidas de mitigación, con el fin de reducir, con el pasar de los años, las emisiones emitidas o estimadas. Las medidas de mitigación son diferentes para cada sector, y cada medida tiene diferente costo de reducción por tonelada de CO<sub>2</sub>eq, por lo que un error en las estimaciones al considerar un valor o escenario poco realista o muy extremo, puede significar un costo elevado, no requerido, al imponer medidas de reducción excesivas, o dichas medidas pueden llegar a ser insuficientes para cumplir con los compromisos que el país contraiga.

Se concentrará el trabajo en 2 de los sectores que concentran la mayor cantidad de emisiones en el país, que son los sectores:

- Industria y Minería
- Comercial, público y residencial

Estos sectores concentran más del 80% de las emisiones si se considera que los resultados obtenidos en ambos sectores, para demanda eléctrica, son el input para prácticamente la totalidad del sector de generación eléctrica, siendo el sector con mayor nivel de emisiones y variabilidad.

Los estudios no logran definir una línea base clara para poder llevar a cabo decisiones con respecto a las medidas de mitigación a utilizar, dado que los resultados entregados están contenidos en rangos amplios.

Para poder evaluar si el enfoque de probabilidades a utilizar es efectivo, se trabajará en un modelo probabilístico para la estimación de emisiones, el cual se explicará más adelante. Este enfoque de probabilidad implica asignar distribuciones a las variables involucradas en cada sector, que cumplan con las características necesarias para ello.

### 3 METODOLOGIA

Para llevar a cabo esta memoria, se utilizará como base metodológica la clasificación propuesta en el libro *Uncertainty*, de Granger y Morgan, adaptándolo y complementándolo a las condiciones impuestas en el objetivo general y los objetivos específicos. Es por esto que se identifican las siguientes etapas metodológicas:

- **Identificación, clasificación y asignación de distribuciones a variables clave:**
  - Esta etapa busca en un primer paso identificar las variables importantes en los 2 sectores a trabajar, a través de entrevistas con expertos en el tema, y a lo referido en la literatura.
  - En un segundo paso, en caso de no ser suficiente con el primer punto, se utilizará el método de clasificación sugeridos por Granger & Morgan, en su libro “*Uncertainty*”, para determinar las variables que requieran ser explicadas mediante distribuciones de probabilidades. Se cuentan con distintos escenarios para la mayoría de variables, lo que ayuda a deducir su distribución por año. También se complementa con literatura internacional de la forma en que se trata la incertidumbre en dichas variables.
  
- **Creación de modelo probabilístico para comparar sus resultados con el modelo determinístico:**
  - Esta etapa consiste en crear un modelo que integre las variables con su distribución al modelo inicial. Para ello se desarrollará un modelo que replique el original, en Excel, apoyado en el complemento Crystal Ball, que permite realizar simulaciones, específicamente del modelo de Montecarlo.
  - Acto siguiente, se analizará la validez del modelo, a través de la comparación de resultados de ambos modelos, utilizando los valores de los escenarios determinísticos. El modelo probabilístico debiera ser capaz de replicar los valores del modelo determinístico original.
  - Se realizarán las simulaciones del modelo probabilístico, considerando las variables aleatorias con sus distribuciones respectivas, para luego poder calcular las emisiones de GEI y la demanda eléctrica.
  
- **Determinación de importancia de las variables:**
  - La base de esta etapa es el análisis de importancia de las variables, el cual permite determinar en qué medida cada variable influye en la incertidumbre de la estimación, pudiendo rankear las variables del modelo a fin de focalizar trabajos futuros en aquellas que impacten en mayor medida.

## 4 MARCO CONCEPTUAL

En esta sección, se describe la teoría que se encuentra detrás de toda la investigación realizada.

### SIMULACIÓN DE MONTECARLO

La simulación de Montecarlo es un método que permite resolver problemas, sean éstos físicos y/o matemáticos, a través de la simulación de variables aleatorias, previamente definidas. En otras palabras, se simula la realidad, de forma aleatoria.<sup>8</sup>

Es de gran utilidad cuando se presentan realidades o problemas que se quieren analizar, de los cuales no se tiene toda la información, es decir, presentan un alto grado de incertidumbre. También existen casos donde se realiza simulación de Montecarlo dado que la experimentación de dicha realidad o problema es muy costosa, o imposible de realizar.

“Permite tener en cuenta para el análisis un elevado número de escenarios aleatorios, por lo que, se puede decir que hace posible llevar la técnica del análisis de escenarios al infinito ampliando la perspectiva de los escenarios posibles”.<sup>9</sup>

Es necesario identificar de buena manera cuáles son las variables clave en la situación a simular, para poder llegar a un resultado significativo de lo que se espera explicar.

### DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD

Una distribución de probabilidad busca explicar el comportamiento de la variable aleatoria estudiada. Por lo tanto, abarca todo el rango de posibles valores que podría obtener.<sup>10</sup>

Las distribuciones más conocidas con la Normal, Beta, Gamma, logarítmica y lognormal. Cada una tiene distintos parámetros, y ajusta de distinta manera los datos de la variable aleatoria. Para saber qué distribución ajusta mejor los datos que otra, se utilizan estadísticos para rankear el ajuste de las distribuciones a los datos. El más conocido es el de Kolmogorov-Smirnov, que es un test no paramétrica usado para comparar una muestra de datos con una posible distribución de probabilidad.

Lo importante es que permite tomar decisiones frente a escenarios de incertidumbre, entregando posibles valores de la variable a pesar de no tener información sobre ella.

### MODELO ECONOMÉTRICO

Algunos cálculos de emisiones de sectores están basados en modelos econométricos realizados por MAPS. Estos son modelos matemáticos que entregan la relación entre variables endógenas y exógenas, que son capaces de explicar el comportamiento del modelo a estudiar. Esto considera

---

<sup>8</sup> [https://www.uam.es/personal\\_pdi/ciencias/carlosp/html/pid/montecarlo.html](https://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/carlosp/html/pid/montecarlo.html)

<sup>9</sup> <http://www.expansion.com/diccionario-economico/simulacion-de-monte-carlo.html>

<sup>10</sup> <http://metodoscuantitativo2.galeon.com/enlaces2218784.html>

tanto el lado determinista como no determinista del modelo. Su utilidad recae en apoyar la toma de decisiones en ámbitos económicos.<sup>11</sup>

Estos modelos cuantifican las relaciones o fenómeno económicos que afectan a las variables. Se debe generar el modelo econométrico a partir de un modelo económico.

En general, los modelos econométricos tienen por objeto dotar de contenido cuantitativo las relaciones o fenómenos económicos. La explicación racional de tales fenómenos o relaciones corresponde a la teoría económica expresada en modelos económicos.

Un modelo econométrico está compuesto por variables, parámetros, ecuaciones y datos. Tienen diferentes utilidades, entre las que se encuentran predecir los valores de variables, y poder simular situaciones planteadas.<sup>12</sup>

Se mostrarán tablas con los resultados de modelos econométricos. Los valores son los coeficientes que acompañan a la variable respectiva, a la hora de realizar los cálculos.

## PROYECCIONES DETERMINÍSTICAS Y PROBABILÍSTICAS

Las proyecciones determinísticas y probabilísticas son metodologías utilizadas para capturar variaciones de variables en modelos de proyección de algún comportamiento o situación.

En los modelos determinísticos se tienen valores únicos por escenarios. Se puede tener más de un escenario, pero todos los valores son fijos para cada escenario. Es un modelo muy utilizado y no es complejo de llevar a cabo, pero ignora las variaciones que pueden sufrir la o las variables en el tiempo, sean esperables o no.

Para tratar de capturar dicha variación es que se utilizan los modelos probabilísticos, ya que este modelo evalúa el posible cambio del valor de la o las variables, utilizando probabilidades, por lo que parte de la incertidumbre de esta variación es capturado con esta metodología. Además, este tipo de modelamiento permite simular situaciones donde a la variable que varía se le asigna una distribución de probabilidades, pudiendo obtener diferentes resultados dependiendo de la variación del valor de la variable.<sup>13</sup>

## ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

El análisis de sensibilidad consiste en identificar la importancia de las variables dentro de la evaluación de un proyecto, estimación de una proyección, etc. Se realiza manteniendo fijo todo el modelo excepto la variable a analizar. Sólo se varía una variable a la vez, y se observa cuánto

---

<sup>11</sup> <http://www.expansion.com/diccionario-economico/modelo-econometrico.html>

<sup>12</sup> [https://www.uam.es/docencia/predysim/combinado6/6\\_1\\_ficha.htm](https://www.uam.es/docencia/predysim/combinado6/6_1_ficha.htm)

<sup>13</sup> [http://www.palisade.com/downloads/UserConf/LTA11/2011DFConf\\_LaImportanciaDeEvaluarEIRie sgo.pdf](http://www.palisade.com/downloads/UserConf/LTA11/2011DFConf_LaImportanciaDeEvaluarEIRie sgo.pdf)

cambia el resultado obtenido. A mayor variación, el modelo o situación es más sensible a esa variable, por lo que dicha variable cobra más importancia.

Entonces, se considerará que el proyecto o estimación es sensible a la variación de esa variable, si la decisión tomada cambia al considerar las variaciones de la variable en el resultado.

A través del análisis se puede decidir realizar estudios específicos adicionales para las variables a las cuales el modelo es sensible, para tratar de reducir el error asociado en las estimaciones, y por ende, llegar a un resultado más confiable.<sup>14</sup>

#### TEOREMA DE CHEBYSHEV

El teorema de Chebyshev es un teorema que entrega la dispersión para distribuciones que buscan, con cierta probabilidad, que los valores que tome la variable aleatoria estén dentro de un rango determinado. En este caso ese rango está determinado por  $k$  desviaciones estándar alrededor de la media. Entrega un resultado estadístico ofreciendo tanto una cota superior como una inferior, a la probabilidad de que la variable se encuentre en ese rango, a cierta distancia de su media o esperanza matemática.<sup>15</sup>

Entonces, la probabilidad de que una variable aleatoria “ $X$ ”, con su media “ $\mu$ ” y desviación estándar “ $\sigma$ ” esté contenida en el rango definido por  $k*\sigma$ , para  $k>1$  constante, es por lo menos de:<sup>16</sup>

$$1 - \frac{1}{k^2}$$

Esto se ve reflejado en la siguiente ecuación:

$$P(\mu - k\sigma < X < \mu + k\sigma) \geq 1 - \frac{1}{k^2}$$

---

<sup>14</sup> Preparación y Evaluación de proyectos, quinta edición. Nassir Sapag, Reinaldo Sapag.

<sup>15</sup> [http://www.academia.edu/6345866/Teorema\\_de\\_Chebyshev](http://www.academia.edu/6345866/Teorema_de_Chebyshev)

<sup>16</sup> [http://probabilidadunad1.blogspot.cl/2010/05/teorema-de-chebyshev\\_14.html](http://probabilidadunad1.blogspot.cl/2010/05/teorema-de-chebyshev_14.html)

## 5 EL MODELO DETERMINÍSTICO

En la actualidad MAPS Chile trabaja con distintos escenarios determinísticos, para estimar la línea base de emisiones de gases de efecto invernadero para el 2030. A continuación, se explicará cómo se realizan estos cálculos, específicamente para los 2 sectores a trabajar, el de Industria y Minería, y el sector Comercial, Público y Residencial. Luego se analizarán las diferencias que presenta el modelo MAPS con el modelo replicado, que es la base para el modelo probabilístico, para luego explicar cómo se calculan las emisiones de ambos modelos, para los sectores ya señalados, y concluir si sus diferencias son significativas o no.

### 5.1 Modelo MAPS

#### 5.1.1 Supuestos Clave

La estimación de la línea base cuenta con variables exógenas comunes para todos los sectores, y sobre estas, supuestos que definen su proyección. Estas variables son:<sup>17</sup>

- Población
- PIB
- Tipo de cambio nominal
- Tasa de interés nominal
- Criterio de proyección población regional
- Criterio de proyección PIB Regional
- Precio combustibles
- Factores de emisión de GEI

#### 5.1.2 Sector Industria y Minería

El sector Industria y Minería se divide en sub sectores, a los cuales se les calcula las emisiones y demanda eléctrica de manera independiente, y luego se consolidan los resultados para tener el total del sector. Los subsectores son:

- Cobre
- Minas Varias
- Industrias Varias
- Hierro
- Procesos Industriales
- Salitre
- Papel y Celulosa
- Siderurgia
- Cemento
- Azúcar
- Pesca
- Petroquímica

---

<sup>17</sup> Resultado de Fase 2 MAPS Chile.

Los sub sectores más importantes son el de cobre, minas varias e industrias varias, los que concentran más del 50% de las emisiones, y son los sectores con mayor incremento proyectado de las mismas, superando el 100%, 75% y 60% de crecimiento al 2030 respectivamente.

Sus principales características son:

- Fuentes de emisiones de GEI:
  - Consumo de combustibles fósiles
  - Consumo de electricidad
  - Emisiones procesos industriales
- Principales fuentes de información:
  - Información de consumos energéticos y factores unitarios de COCHILCO.
  - Proyecciones producción y consumos de agua de COCHILCO, estudios internacionales de demanda mundial (Brook Hunt, CRU) al 2035.
  - Consumos por uso: eléctrico, motriz, calor según (BNE, 2011) y otros estudios.
  - Estimaciones de precios de minerales
  - Estadísticas y proyecciones económicas internacionales (Escenario Climático A2 IPCC, Banco Mundial).
  - Perspectivas tecnológicas mundiales.
  - Consumo energético histórico (BNE).
- Principales drivers
  - Minería:
    - Producción de cobre y otros minerales.
    - Material procesado.
    - Precio del cobre y otros minerales.
    - PIB.
    - Penetración de tecnologías.
    - Precios de los energéticos.
    - Consumo de agua.
  - Otras industrias:
    - PIB Nacional, Internacional.
    - Producción de los subsectores.
    - Precios de los energéticos.

El detalle del cálculo, tanto de emisiones de GEI, como de la demanda eléctrica, se encuentra en anexo 11.2.

### 5.1.3 Sector Comercial, Público y Residencial

De los 3 subsectores, el sector residencial es el que aporta la mayoría de toneladas de emisiones de GEI, seguido por el sector comercial. El sector público es el que menos aporta, siendo casi despreciable en comparación a los otros 2 subsectores. Además, éste no presenta un crecimiento significativo en las proyecciones.

Sus principales características son:

- Fuentes de emisiones de GEI:
  - Consumo de combustibles fósiles
  - Consumo de electricidad

- Consumo de leña
- Principales fuentes de información:
  - Caracterización de viviendas. Encuesta CASEN 2011
  - Tenencia y uso de artefactos. Encuesta Casen 2009
  - Estudio de caracterización de usos CDT (2010)
  - Ventas de equipos
  - Ventas de electricidad por cliente
  - Perspectivas tecnológicas
  - Permisos de edificación (INE)
  - Consumo energético histórico (BNE)
- Principales drivers
  - Número de viviendas
  - PIB per cápita
  - Crecimiento de la población
  - Número de unidades construidas
  - Índices sectoriales internacionales

El detalle del cálculo, tanto de emisiones de GEI, como de la demanda eléctrica, se encuentra en anexos 11.3.

#### 5.1.4 Sector generación eléctrica

Este sector se ve influenciado de manera directa de los sectores anteriores, dado que éstos entregan un resultado de demanda eléctrica, lo que es un insumo para este sector. Con dicho resultado se genera la estimación de emisiones de GEI, lo que da a entender que este sector presenta gran incertidumbre, ya que sumada a la propia del sector, arrastra la incertidumbre de los otros sectores en sus resultados de demanda eléctrica.

Sus principales características son:

- Fuentes de emisiones de GEI:
  - Quema de combustible para generación de electricidad en centrales termoeléctricas
- Principales fuentes de información:
  - Base de datos CDEC-SIC, CDEC-SING, CNE
  - Informe Precio Nudo (IPN) abril y octubre 2013
  - Proyectos en evaluación
  - Estudios disponibles durante el 2013
- Principales drivers
  - Demanda eléctrica

#### 5.2 Resultados publicados

En los informes oficiales se publicaron los resultados tanto de emisiones como de consumo energético de los sectores. Es importante señalar que el consumo energético de electricidad del sector Industria y Minería, y el del sector CPR son el principal insumo para otro sector analizado por MAPS, el sector de generación eléctrica, sector que cuenta con la mayor cantidad de emisiones de GEI, y mayor diferencia entre sus proyecciones al 2030 (más del 90% del input de demanda eléctrica).

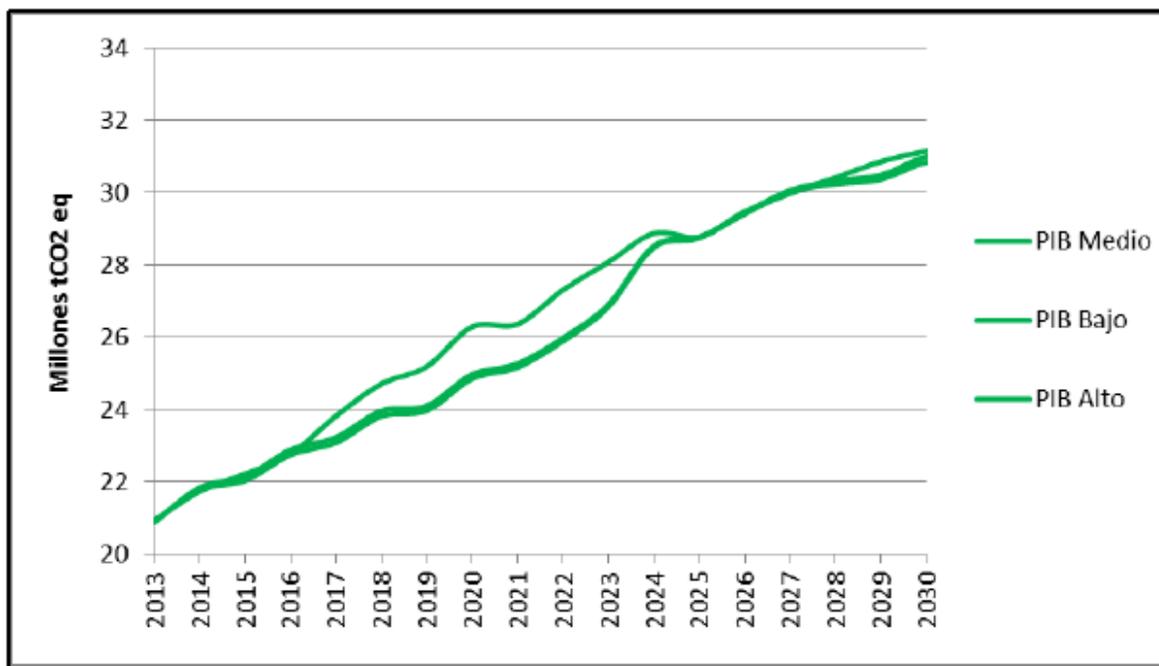
### 5.2.1 Sector Industria y Minería

Las estimaciones al 2030 se comportan de manera creciente, sin mayores diferencias entre los distintos escenarios. Se entregan los valores extremos en la tabla 2, mientras que en la figura 4 se puede apreciar el crecimiento anual durante este periodo.

Tabla 2 Emisiones del sector Industria y Minería

Escenarios	2013	2020	2030
PIB Medio	20,9	24,9	31,0
PIB Bajo	20,9	25,0	30,8
PIB Alto	20,9	26,3	31,2

Gráfico 4 Emisiones proyectadas sector Industria y Minería



Fuente: Resultados fase 2 MAPS.

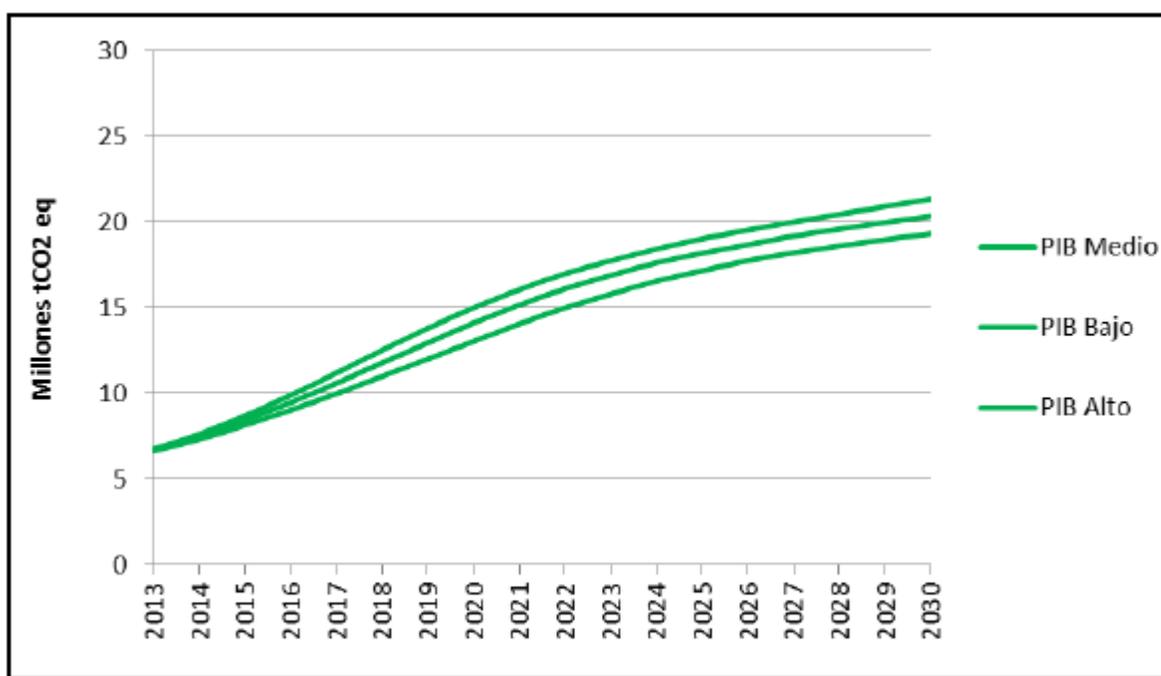
### 5.2.2 Sector Comercial, Público y Residencial

Las estimaciones al 2030 se comportan de manera creciente, llegando a tener diferencias de 2 millones de toneladas. Se entregan los valores extremos en la tabla 3, mientras que en la figura 5 se puede apreciar el crecimiento anual durante este periodo.

Tabla 3 Emisiones del sector CPR

Escenarios	2013	2020	2030
PIB Medio	6,7	14,1	20,4
PIB Bajo	6,7	13,1	19,3
PIB Alto	6,8	15,0	21,3

Gráfico 5 Emisiones proyectadas sector CPR



Fuente: Resultados fase 2 MAPS.

### 5.3 Modelo determinístico replicado

#### 5.3.1 Justificación

Para poder simular a través del complemento Crystal Ball, es necesario tener la totalidad del modelo en Excel, completamente referenciado. Esto supone un problema para el sector de minería, ya que su cálculo se apoya en el software LEAP, (Long range Energy Alternatives Planning System), una herramienta de software utilizada para el análisis de la política energética y la

evaluación de la mitigación del cambio<sup>18</sup>, por lo que existe, en principio, un riesgo de que no sea posible llegar a los mismos resultados con un modelo que replique el original.

Para efectos de este trabajo, los valores del modelo que no pueden ser replicados, se utilizarán como input para el nuevo modelo.

### 5.3.2 Descripción del modelo

A continuación se describirá de qué manera el modelo calcula las emisiones de GEI y la demanda eléctrica para cada sector trabajado. Se basó en el modelo utilizado por MAPS Chile, tratando de obtener los resultados más semejantes posible.

#### 5.3.2.1 Sector Industria y Minería

El sector de minería se divide en los mismos subsectores del modelo MAPS.

##### **Cobre:**

Para el cobre, hay que considerar que se analiza el consumo y emisiones de cada proceso por separado. Los procesos son:

- Fundición
- Refinería
- Lixiviación
- Servicios
- Desalinización
- Mina Rajo
- Minas Subterránea
- Concentradora

Los parámetros considerados como input para el modelo son los siguientes:

Participación Combustible  $_{jki}$ : Se refiere a la distribución del consumo de combustibles para cada año, específico de cada proceso.

Tcal por Material Procesado  $_{jk}$ : Consumo energético particular de cada proceso, en cierto año, por tonelada de material procesado.

El consumo energético para el proceso j, del energético i el año k es el siguiente:

$$CE_{jik} = Consumo\ Total_{jk} * Participación\ Energético_{jik}$$

$$Consumo\ Total_{jk} = Teracal\ por\ MP_{jk} * MP\ por\ proceso_{jk}$$

Explicación de variables y parámetros:

Producción de cobre: A partir de ella se puede calcular cuánto MP por proceso se tendrá. Varía dependiendo de los proyectos que se tienen en carpeta para los siguientes año, cada uno con cierto

---

<sup>18</sup> <http://www.energycommunity.org/LEAP/>

grado de incertidumbre con respecto a su realización, todo realizado por Cochilco. En el modelo, se estimó la participación mundial de cobre del país, y dentro de esta la participación que tendrá Chile. Se cuentan con 3 escenarios de esta variable

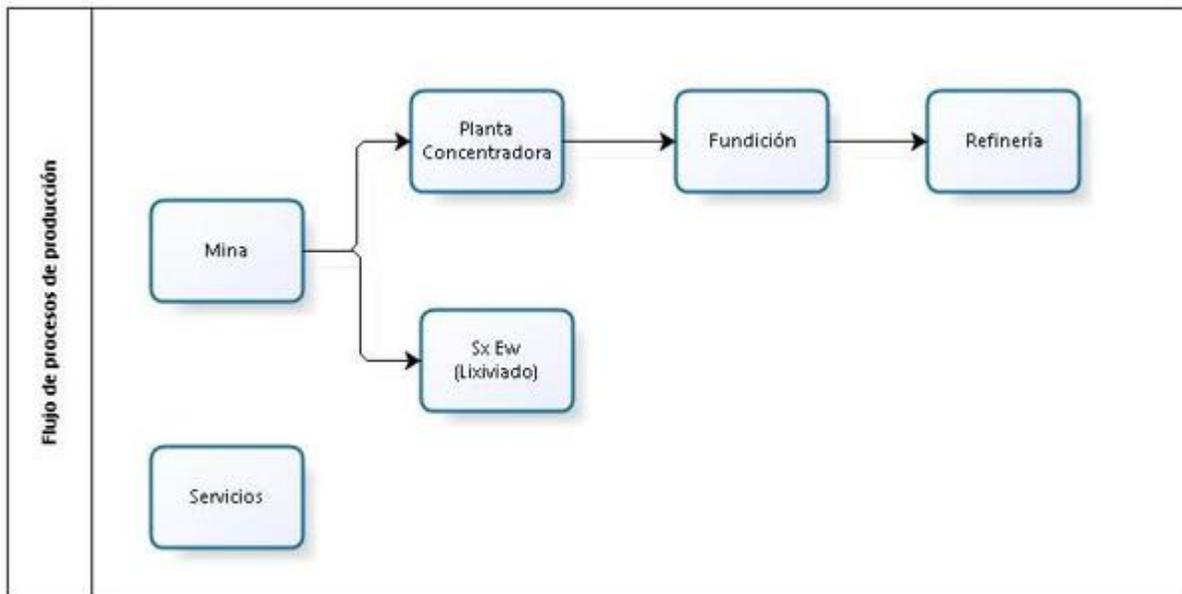
MP por proceso: Cada proceso tiene su % de saturación, tasa de recuperación y ley media de cobre, por lo que a partir de la producción de cobre, se logra obtener cuanto MP se tiene por proceso, para así poder obtener el consumo energético, y posteriormente las emisiones de cada uno. Por ejemplo, para el proceso de lixiviado se tiene que, para conocer las toneladas de MP para cierto año:

$$MP \text{ lixiviado}_k = \frac{\text{Producción de cobre}_k * \text{Saturación lixiviado}_k}{\text{Tasa de recuperación lixiviado}_k * \text{Ley media de cobre}_k}$$

Para el resto de los procesos es análogo, ya que cada uno tiene su saturación y tasa de recuperación propia.

El flujo de los procesos es el siguiente:

Gráfico 6 Flujo de Procesos



La demanda eléctrica será entonces el consumo energético total particular de electricidad.

Las emisiones de GEI se obtienen a partir del consumo particular de cada energético. Cada uno tiene su factor de emisión particular, sea por teracalorías o terajoules, por lo que al final se suman todas las emisiones para tener las emisiones de GEI del subsector Cobre.

$$Emisiones_k = \sum CE \text{ por Energético}_{ik} * \text{Factor de Emisión}_i$$

### Minas Varias:

El cálculo para el subsector de minas varias se basa en el siguiente modelo econométrico, el cuál fue realizado por MAPS Chile:

Tabla 4 Modelo econométrico del sector Minas Varias

C	-0.015938
logPIB_eur	0.119626
logPIB_nac	0.729899

Es directo entonces que al tratar la incertidumbre del PIB nacional, y por ende, sus proyecciones futuras, también se estará trabajando incertidumbre perteneciente al subsector minas varias.

Con dicho modelo, se obtiene la producción, en toneladas, del subsector. Para obtener el consumo energético se cuenta con la intensidad energética [teracal/ton] por uso (Motriz, eléctrico y térmico), con lo que se calcula el consumo por año, para cada uso.

Teniendo el consumo energético anual por uso, es posible calcular el consumo por energético, dado que se tiene la participación de cada energético dado su uso.

Entonces, para poder calcular el consumo total del energético i, uso j, y año k es el siguiente:

$$CE \text{ por uso}_{jk} = Producción \text{ del sector}_k * Intensidad \text{ energética}_{jk}$$

$$CE \text{ por energético}_{ikj} = \sum CE \text{ por uso}_{jk} * Participación \text{ Energético}_{ikj}$$

$$CE \text{ total}_k = \sum CE \text{ por energético}_{ikj}$$

Las emisiones de GEI se obtienen a partir del consumo particular de cada energético. Cada uno tiene su factor de emisión particular, sea por teracalorías o terajoules, por lo que al final se suman todas las emisiones para tener las emisiones de GEI del subsector Minas Varias.

$$Emisiones_k = \sum CE \text{ por energético}_{ik} * Factor \text{ de Emisión}_i$$

### Industrias Varias:

El cálculo para el subsector de industrias varias depende directamente del PIB nacional. El consumo energético del sector se obtiene a partir del PIB nacional, siendo multiplicado por la intensidad energética de cada uso.

Con dicho modelo, se obtiene el consumo energético por año. Para obtener dicho consumo, se cuenta con la participación de cada energético por año, y por uso (Motriz, eléctrico y térmico), con lo que, para cada energético, se calcula su consumo anual.

Teniendo el consumo anual de cada uno, se obtienen las emisiones de GEI al tener el factor de emisión de cada energético.

Entonces, para poder calcular el consumo total del energético i, uso j, y año k es el siguiente:

$$CE \text{ por uso}_{jk} = PIB \text{ Nacional}_k * Intensidad \text{ energética}_{jk}$$

$$CE \text{ por energético}_{ikj} = \sum CE \text{ por uso}_{jk} * Participación \text{ Energético}_{ikj}$$

$$CE \text{ total}_k = \sum CE \text{ por energético}_{ikj}$$

Las emisiones de GEI se obtienen a partir del consumo particular de cada energético. Cada uno tiene su factor de emisión particular, sea por teracalorías o terajoules, por lo que al final se suman todas las emisiones para tener las emisiones de GEI del subsector Industrias Varias.

$$Emisiones_k = \sum CE \text{ por energético}_{ik} * Factor \text{ de Emisión}_i$$

### Hierro:

El cálculo para el subsector hierro se basa en el siguiente modelo econométrico, realizado por MAPS Chile:

Tabla 5 Modelo econométrico del sector Minas Varias

C	6.84488
Dummieh2	0.63766
logPIBregIII	0.15463

A diferencia de los otros subsectores, depende de un PIB regional, específicamente de la tercera región, y no del PIB total del país. Esto se debe principalmente a que dicha actividad se concentra en la tercera región.

Con dicho modelo, se obtiene la producción, en toneladas, de hierro. Para obtener el consumo energético se cuenta con la intensidad energética [teracal/ton] por uso (Motriz, eléctrico y térmico), con lo que se calcula el consumo energético por año, para cada uso.

Teniendo el consumo energético anual por uso, es posible calcular el consumo por energético, dado que se tiene la participación de cada energético dado su uso.

Entonces, para poder calcular el consumo total del energético i, uso j, y año k es el siguiente:

$$CE \text{ por uso}_{jk} = Producción \text{ de Hierro}_k * Intensidad \text{ energética}_{jk}$$

$$CE \text{ por energético}_{ikj} = \sum CE \text{ por uso}_{jk} * Participación \text{ Energético}_{ikj}$$

$$CE \text{ total}_k = \sum CE \text{ por energético}_{ikj}$$

Las emisiones de GEI se obtienen a partir del consumo particular de cada energético. Cada uno tiene su factor de emisión particular, sea por teracalorías o terajoules, por lo que al final se suman todas las emisiones para tener las emisiones de GEI del subsector Hierro.

$$Emisiones_k = \sum CE \text{ por energético}_{ik} * Factor \text{ de Emisión}_i$$

## Resto de los subsectores

Para el resto de los subsectores no se les desarrolló un modelo determinístico replicado, debido a alguno de los siguientes factores:

- La emisión particular del subsector es insignificante en comparación a la de los ya mencionados
- Su crecimiento o decrecimiento en las emisiones de GEI o consumo energético es muy bajo, o nulo

Es por esto, que los siguientes subsectores no sufren variación en el modelo replicado, independiente del escenario:

- Salitre
- Papel y Celulosa
- Siderurgia
- Cemento
- Azúcar
- Pesca
- Petroquímica
- Procesos Industriales

### 5.3.2.2 Sector Comercial, Público y Residencial

A continuación se describirá el sector Comercial, Público y Residencial (CPR), descripción obtenida del informe específico del sector CPR de MAPS Chile, incluyendo sus sub-divisiones.

#### Sector Residencial

Para el sector residencial, el driver principal es la vivienda. Importa la cantidad de viviendas en el país, y su distribución en las diferentes zonas térmicas y otras subcategoría que serán explicadas a continuación:

#### ZONA TÉRMICA

Debido a la distribución que tiene Chile en el planeta, dependiendo de lugar que uno se encuentre, se tendrán diversos climas, y por ende, distintas necesidades de uso final. Por ejemplo, climas muy fríos demandarán mayor calefacción, y dependiendo del lugar, será también el tipo de energético utilizado. De acuerdo al artículo 4.1.10 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcción<sup>19</sup>, existen 7 zonas térmicas en las que se divide el país, basados en la unidad “Grados Día de Calefacción anuales”. Dicha clasificación es la siguiente:

- Zona 1: menor a 500 grados día anuales
- Zona 2: entre 500 y 750 grados día anuales
- Zona 3: entre 750 y 1,000 grados día anuales
- Zona 4: entre 1,000 y 1,250 grados día anuales
- Zona 5: entre 1,250 y 1,500 grados día anuales
- Zona 6: entre 1,500 y 2,000 grados día anuales

---

<sup>19</sup> Informe Final CPR, MAPS Chile.

- Zona 7: más de 2,000 grados día anuales

Las regiones fueron agruparon en zonas de similares características:

- Zona A (Norte-Centro Norte): compuesta por las zonas térmicas 1 y 2, y presenta un comportamiento menor 750° día-anales.
- Zona B (Centro Sur – Sur): compuesto por las zonas térmicas 3, 4 y 5, y presenta un comportamiento entre 750° y 1500° día-anales.
- Zona C (Sur -Austral – Cordillera): compuesto por las zonas térmicas 6 y 7, y presenta un comportamiento mayor a 1500° día-anales.

## TIPOLOGÍA CONSTRUCTIVA DE VIVIENDA

Se distingue entre vivienda unifamiliar, sea ésta aislada, pareada o en fila, y vivienda multifamiliar, debido a sus diferentes características de consumo y cantidad existentes.

## ZONA URBANA O RURAL

Se distingue entre zona urbana y rural ya que permite capturar los consumos energéticos y emisiones derivado de la centralización de viviendas.

## SISTEMA INTERCONECTADO (SIC O SING)

Permite, para el caso de consumo eléctrico, obtener las demandas por cada sistema por separado.

También se separa con respecto a su uso final:

- Calefacción.
- Artefactos eléctricos.
- Agua caliente sanitaria y cocción.

Entonces, para cada uso final, se analizará la siguiente distribución de viviendas:

- Zona A Urb. Depto.
- Zona A Urb. Casa.
- Zona A Rural.
- Zona B Urb. Depto.
- Zona B Urb. Casa.
- Zona B Rural.
- Zona C Urb. Depto.
- Zona C Urb. Casa.
- Zona C Rural.

Calculo de emisiones de GEI y demanda eléctrica:

Para el uso final de calefacción y ACS, las emisiones para cada subcategoría s es el siguiente:

$$Emisiones_s = CE \text{ por energético}_s * \text{Factor de Emisión}$$

El consumo energético total para el combustible i es el siguiente:

$$CE\ total_s = \sum CE_{is} * NV_s$$

$$Emisiones\ totales_s = \sum Emisiones_{si} * NV_s$$

Para el uso final de artefactos eléctricos, solo se tiene consumo eléctrico, lo que se calcula de la siguiente manera, para el artefacto eléctrico j del subsector s:

$$CE\ total_s = \sum CE_{js} * NV_{js}$$

### Sector Comercial y Público

A estos sectores no se les aplicó incertidumbre por las siguientes razones:

Sector público, tanto en emisiones de GEI como demanda eléctrica tiene una participación despreciable, siendo esta bajo el 4.5% en todo momento.

Sector comercial en demanda eléctrica, si bien, aproximadamente triplica su consumo, no supera al sector residencial, que es el sector con participación mayoritaria en la demanda eléctrica, y en emisiones la mayoría la concentra el sector residencial.

### 5.3.3 Validación del modelo

Para validar que el modelo determinístico replicado se construyó de buena manera, y emula al original de buena forma, se compararán los resultados determinísticos de ambos modelos. Se espera que los resultados sean similares, idealmente iguales. Debido a que el modelo original trabaja con un software externo es que se espera que haya una pequeña variación. El objetivo es replicar el modelo lo más parecido posible. Hay que considerar que a algunos subsectores no se les aplica incertidumbre, por lo que no variarán de un modelo a otro.

Se tomará como año de comparación el año 2030, ya que es el año más lejano del horizonte de tiempo a evaluar, por ende, el que presenta mayor incertidumbre para las proyecciones. En el caso del cobre se aceptará un error ligeramente mayor, dado que la manera en la que se trabajó la incertidumbre en la producción de esta variable, se obtienen valores de menor magnitud, pero se generan casos más realistas.

En la siguiente tabla se encuentra el detalle de la validación del modelo replicado para el sector Industria y Minería, para las emisiones de GEI:

Tabla 6 Validación del modelo replicado sector Industria y Minería, emisiones de GEI

Año 2030 Subsector	Emisiones en MMtCO <sub>2</sub> eq			
	MAPs	Modelo Probabilístico	Diferencia	%error
<b>Cobre</b>	10.50	9.12	-1.38	-13.10%
<b>Minas Varias</b>	1.80	1.99	0.19	10.44%
<b>Industrias Varias</b>	7.79	7.79	0.00	0.00%
<b>Hierro</b>	0.50	0.55	0.05	10.00%
<b>Procesos Industriales</b>	6.20	6.22	0.02	0.32%

<b>Salitre</b>	0.50	0.52	0.02	4.00%
<b>Papel y Celulosa</b>	1.10	1.15	0.05	4.11%
<b>Siderurgia</b>	0.31	0.32	0.01	3.23%
<b>Cemento</b>	0.91	0.91	0.00	0.00%
<b>Azúcar</b>	0.35	0.38	0.03	8.57%
<b>Pesca</b>	0.80	0.83	0.03	3.75%
<b>Petroquímica</b>	0.41	0.41	0.00	0.00%
<b>Emisiones MMtCO2eq</b>	31.17	30.19		
			Promedio	2.61%

Como se puede observar, las diferencias por subsector son pequeñas, así como también el total de emisiones del año 2030, por lo que se puede considerar como válida la replicación del modelo.

Ahora, para el caso de consumo eléctrico tenemos:

Tabla 7 Validación del modelo replicado sector Industria y Minería, demanda eléctrica

<u>Año 2030</u>	<u>Dda eléctrica</u>			
<b>Subsector</b>	<b>MAPs</b>	<b>Modelo Probabilístico</b>	<b>Diferencia</b>	<b>%error</b>
<b>Cobre</b>	41757.50	37134.04	-4623.46	-11.07%
<b>Minas Varias</b>	2909.40	3153.88	244.48	8.40%
<b>Industrias Varias</b>	17245.65	17245.65	0.00	0.00%
<b>Hierro</b>	417.03	467.25	50.22	12.04%
<b>Salitre</b>	580.55	580.55	0.00	0.00%
<b>Papel y Celulosa</b>	7270.29	7270.29	0.00	0.00%
<b>Siderurgia</b>	366.65	366.65	0.00	0.00%
<b>Cemento</b>	782.41	782.41	0.00	0.00%
<b>Azúcar</b>	18.43	18.43	0.00	0.00%
<b>Pesca</b>	130.64	130.64	0.00	0.00%
<b>Petroquímica</b>	166.598	166.598	0.00	0.00%
<b>Total dda eléctrica</b>	71645.14	67316.38		
			Promedio	0.85%

Se puede observar, al igual que para las emisiones, que se obtienen los mismos valores, con la excepción de 2 subsectores, pero en estos, la variación es mínima en comparación al total.

Se concluye entonces que para el sector de Industria y Minería, el modelo replicado es válido para ser utilizado como base para el modelo probabilístico.

Ahora, para el caso del sector Comercial, Público y Residencial:

En la siguiente tabla se encuentra el detalle de la validación del modelo replicado para el sector CPR, para las emisiones de GEI:

Tabla 8 Validación del modelo replicado sector CPR, emisiones de GEI

Año 2030	Emisiones en MMtCO <sub>2</sub> eq			
Subsector	MAPs	Modelo Probabilístico	Diferencia	%error
<b>Comercial</b>	7.27	7.27	0.00	0.00%
<b>Público</b>	0.35	0.35	0.00	0.00%
<b>Residencial</b>	12.74	12.60	-0.139	-1.09%
<b>Emisiones millTonCO<sub>2</sub></b>	20.36	20.22	-0.14	
			Promedio	-0.36%

Se puede observar que para el sector a trabajar, las diferencias son mínimas entre el modelo replicado y el modelo determinístico original, por lo tanto, en cuanto a emisiones es válido el modelo.

Para la demanda eléctrica del sector se tiene lo siguiente:

Tabla 9 Validación del modelo replicado sector CPR, demanda eléctrica

Año 2030	Dda eléctrica			
Subsector	MAPs	Modelo Probabilístico	Diferencia	%error
<b>Comercial</b>	13841.82	13841.82	0.00	0.00%
<b>Público</b>	1736.07	1736.07	0.00	0.00%
<b>Residencial</b>	25243.69	24283.74	-959.95	-3.80%
<b>Total dda eléctrica</b>	40821.58	39861.63	-959.95	
			Promedio	-1.27%

Si bien la diferencia es mayor que para las emisiones, ésta es de una magnitud pequeña, lo que de todas formas valida el modelo a utilizar.

Se concluye entonces que para el sector CPR, el modelo replicado es válido para ser utilizado como base para el modelo probabilístico.

#### 5.3.4 Resultados

Habiendo validado el modelo determinístico replicado, se entregarán los resultados obtenidos para ambos sectores tanto en emisiones como en demanda eléctrica.

##### 5.3.4.1 Sector Industria y Minería

Se entregan los resultados para los años 2015, 2020, 2025 y 2030 tanto de emisiones de GEI como de demanda eléctrica.

La siguiente tabla muestra los resultados para las emisiones de GEI:

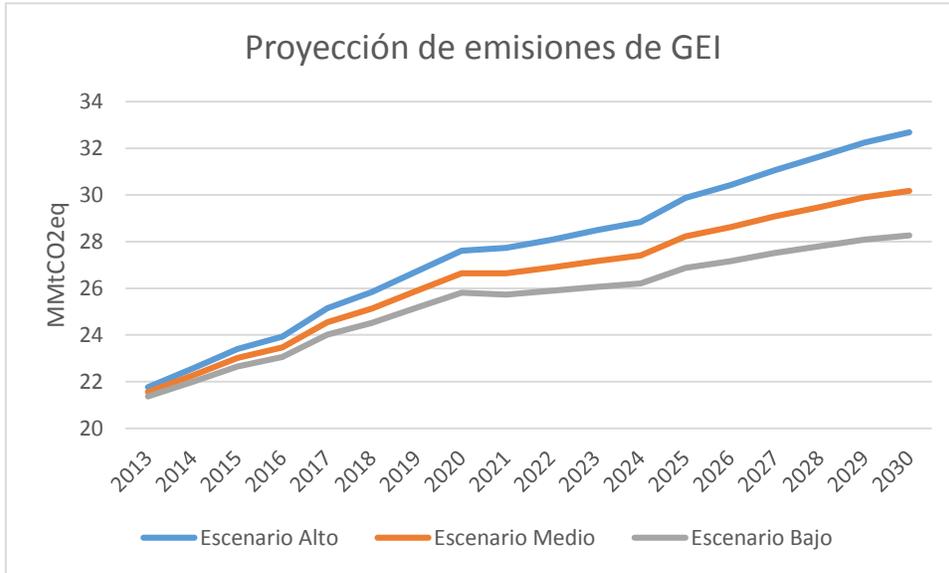
Tabla 10 Emisiones de GEI: Modelo determinístico replicado, industria y minería

Escenario/Año	2015	2020	2025	2030
<b>Bajo</b>	22.65	25.81	26.88	28.27
<b>Medio</b>	23.01	26.64	28.22	30.18

**Alto**                      23.40    27.61    29.87    32.68

Gráficamente, se puede observar la evolución de las emisiones entre los años 2013 y 2030:

Gráfico 7 Proyección de emisiones de GEI: Modelo determinístico replicado, industria y minería



Se pueden notar emisiones crecientes a través de los años, mostrando una separación considerable entre los escenarios extremos a partir del año 2017.

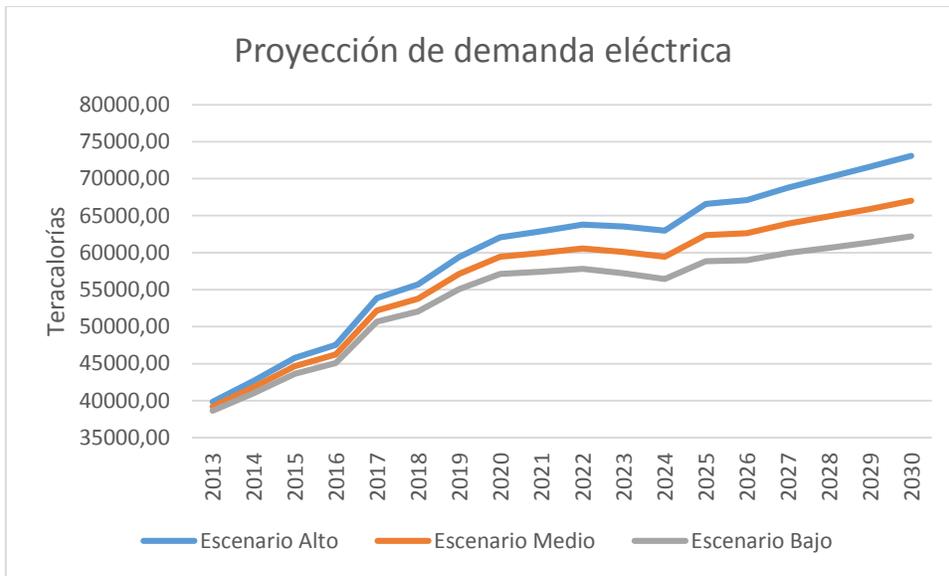
La siguiente tabla muestra los resultados de la demanda eléctrica:

Tabla 11 Demanda eléctrica: Modelo determinístico replicado, industria y minería

Escenario/Año	2015	2020	2025	2030
<b>Bajo</b>	43611.19	57118.87	58850.62	62217.44
<b>Medio</b>	44641.83	59429.79	62352.53	67018.83
<b>Alto</b>	45774.75	62082.57	66581.39	73102.02

Gráficamente, se puede observar la evolución de la demanda eléctrica entre los años 2013 y 2030:

Gráfico 8 Proyección de demanda eléctrica: Modelo determinístico replicado, Industria y Minería



Se puede notar un incremento agresivo a partir del 2016 en la demanda eléctrica.

#### 5.3.4.2 Sector CPR

Se entregan los resultados para los años 2015, 2020, 2025 y 2030 tanto de emisiones de GEI como de demanda eléctrica.

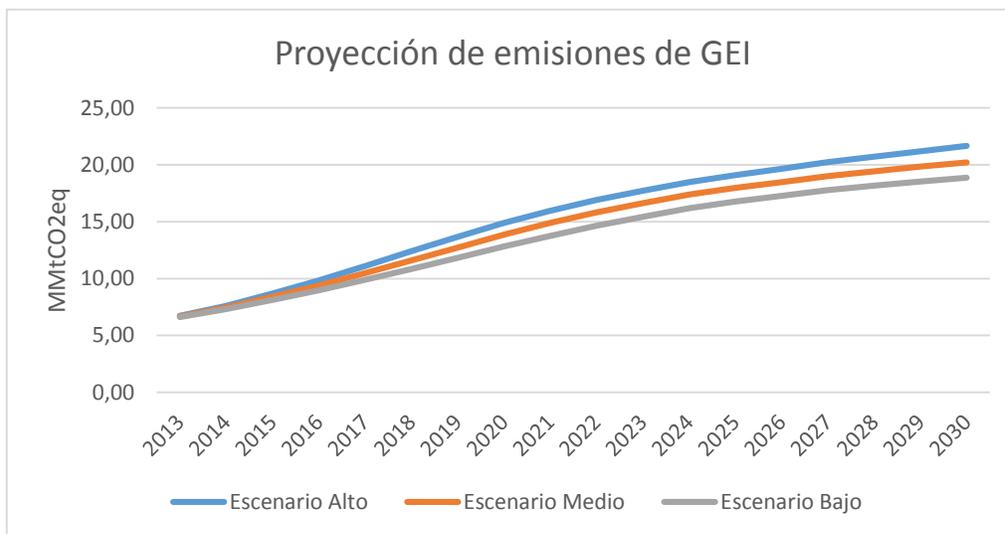
La siguiente tabla muestra los resultados para las emisiones de GEI:

Tabla 12 Emisiones de GEI: Modelo determinístico replicado, sector CPR

Escenario/Año	2015	2020	2025	2030
<b>Bajo</b>	8.13	12.82	16.76	18.86
<b>Medio</b>	8.40	13.86	17.97	20.22
<b>Alto</b>	8.69	14.89	19.10	21.66

Gráficamente, se puede observar la evolución de las emisiones entre los años 2013 y 2030:

Gráfico 9 Proyección de emisiones de GEI: Modelo determinístico replicado, CPR



Se observa un crecimiento constante.

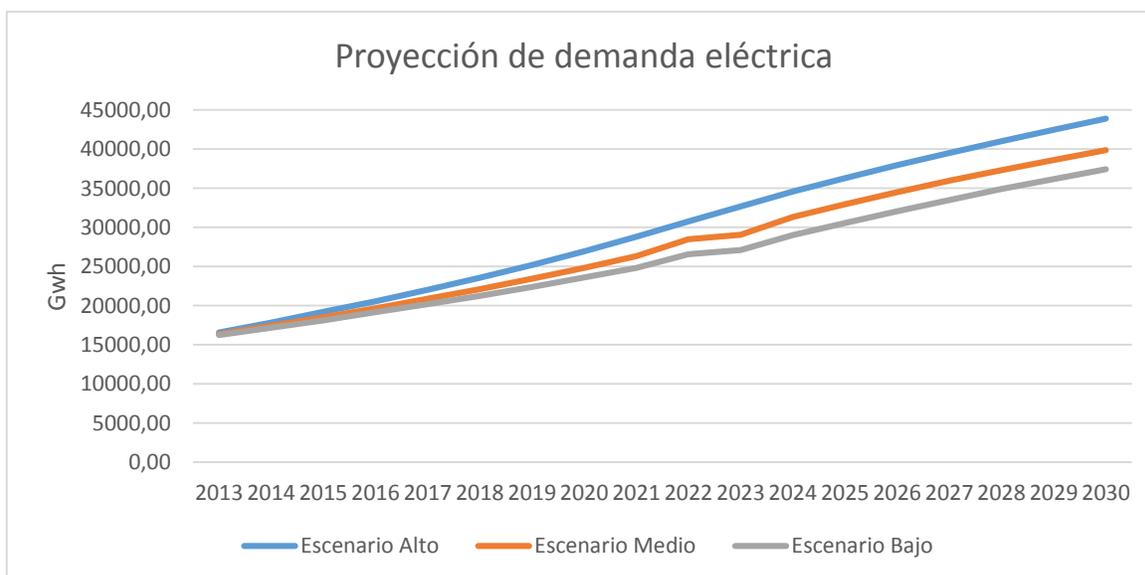
La siguiente tabla muestra los resultados de la demanda eléctrica:

Tabla 13 Demanda eléctrica: Modelo determinístico replicado, CPR

Escenario/Año	2015	2020	2025	2030
<b>Bajo</b>	18128.52	23584.89	30575.29	37438.59
<b>Medio</b>	18525.93	24810.25	32962.61	39861.63
<b>Alto</b>	19202.98	26921.18	36303.28	43887.77

Gráficamente, se puede observar la evolución de la demanda eléctrica entre los años 2013 y 2030:

Gráfico 10 Proyección de demanda eléctrica: Modelo determinístico replicado, CPR



No se observan mayores diferencias entre los distintos escenarios.

## 6 INCORPORANDO INCERTIDUMBRE: EL MODELO PROBABILÍSTICO

### 6.1 ¿POR QUÉ SE INCORPORA INCERTIDUMBRE?

Históricamente la incertidumbre no ha sido considerada. Al poder incorporarla, es decir, tener en cuenta el rango de valores futuros posibles, se obtiene un enfoque más realista<sup>20</sup>. Henrion y Morgan (1992) entregan razones y/o situaciones por la que se debe considerar incertidumbre en los análisis:

- Cuando se está llevando a cabo un análisis en el que la actitud hacia el riesgo de las personas es importante.
- Cuando se está llevando a cabo un análisis en el cual la información incierta de diferentes fuentes debe ser combinada.
- Cuando una decisión debe ser tomada sobre si se debe invertir en adquirir información adicional. Por lo general, mientras mayor sea la incertidumbre, mayor será el valor esperado de la información adicional.
- Cuando la función de pérdida en el análisis tiene un elemento significativo que tiene dependencia del tercer orden en la cantidad incierta y la variable de decisión, y en particular cuando las pérdidas son asimétricas alrededor de la decisión óptima.

### 6.2 VARIABLES CON INCERTIDUMBRE

Para poder identificar qué variables son importantes en cada sector a trabajar, y así obtener las variables candidatas para asignarles una distribución de probabilidad, se llevaron a cabo distintas reuniones con expertos en la materia<sup>21</sup>, llegando a elaborar, en primera instancia, la siguiente lista de variables:

Globales:

- PIB
- Población

Minería:

- Producción de todos los minerales
- Ley de cobre
- Intensidad energética

CPR:

- Número de viviendas
- Confort térmico
- Tenencia de artefactos

Esta lista de variables es la lista de candidatos a ser asignados una distribución probabilística. Para llevarlo a cabo, en una primera instancia se guiará por el libro Uncertainty de Granger y Morgan,

---

<sup>20</sup> An expert elicitation of climate, energy and economic uncertainties". Will Usher, Neil Strachan. Energy Policy 61 (2013) 811-821.

<sup>21</sup> Raúl O’Ryan, Manuel Díaz y Carlos Benavides. Todos involucrados en MAPS Chile.

que presenta una clasificación de variables, donde recomienda cómo tratar la incertidumbre dependiendo del tipo de variable. Esta clasificación se presenta en la tabla 15.

Tabla 14 Resumen de los tipos de cantidad con su respectivo tratamiento de incertidumbre

<b>Tipo de cantidad</b>	<b>Tratamiento de incertidumbre</b>
Parámetro empírico o variable aleatoria	Probabilístico, paramétrico o conversión
Constante definida	Certera por definición
Variable de decisión	Paramétrica o conversión
Parámetro de valor	Paramétrica o conversión
Variable de índice	Certera por definición
Parámetro dominio del modelo	Paramétrica o conversión
Criterio de resultado	Determinada por tratamiento de sus inputs

Fuente: Uncertainty. Granger y Morgan

Con esta clasificación, se podrá decidir qué variables son clasificadas como el primer tipo de cantidad para tratar la incertidumbre de manera probabilística.

Basándose en la metodología propuesta en el libro de Granger y Morgan, y complementándolo con la realidad del modelo replicado, se elaboraron criterios de clasificación para poder definir si una variable es apta para llevar a cabo la asignación de distribuciones.

Los criterios son los siguientes:

- a. Que la variable sea cuantificable
- b. Sea una variable que presente incertidumbre
- c. Disponibilidad de información
- d. Impacto en el modelo replicado
- e. Factibilidad para llevar a cabo en el modelo replicado

Considerando estos criterios, se elaboró la siguiente tabla que resume la clasificación de las variables:

Tabla 15 Cumplimiento de criterios por parte de las variables

Variable/Criterio	Cuantifica ble	Presenta incertidumbre	Disponibilidad de info.	Impacto de modelo	en Factibilidad
<b>Crecimiento del PIB</b>	Si	Si	Si	Si	Si
<b>Población</b>	Si	Si	Si	No	No
<b>Producción de minerales</b>	Si	Algunos minerales	Algunos minerales	Algunos minerales	Algunos minerales
<b>Ley de cobre</b>	Si	Poca	Si	Poca	Sí
<b>Intensidad energética</b>	Si	Si	No	No	No
<b>Número de viviendas</b>	Si	Si	Si	Si	Si

Fuente: Elaboración propia.

Se observan distintas calificaciones para cada variable. Las variables que resultaron no factibles serán explicadas a continuación:

- Población: No tiene real impacto en el modelo ya que el crecimiento de la población chilena se comporta como la de un país desarrollado, por lo tanto, es posible obtener un error pequeño al proyectarla.
- Producción de minerales: Considerando la forma en que se modeló la forma de obtener las emisiones de GEI en la producción de minerales, con la información disponible no es posible replicar dicho cálculo. Además, los minerales que no fueron considerados, en términos de participación en las emisiones, son poco influyentes al total.
- Intensidad energética: No se cuenta con la información disponible para realizar un análisis previo y determinar si es factible tratar su incertidumbre. Además, de la manera que está modelado no permite trabajarlo.

Este cuadro viene a ser el primer filtro de variables para poder decidir cuáles de ellas tienen incertidumbre que afecte al modelo, y que puedan ser incorporadas al modelo replicado. De él se concluye que las variables que serán consideradas como candidatas a poder tener incertidumbre son:

- Crecimiento del PIB
- Población
- Producción de algunos minerales (Cobre, Hierro, Industrias Varias y Minas Varias)
- Ley de Cobre
- Número de viviendas

### 6.3 ¿CÓMO INCORPORAR LA INCERTIDUMBRE?

Teniendo seleccionadas las variables, viene el desafío de ver cómo incorporarles la incertidumbre. Pueden existir datos históricos de las variables, pero la información del pasado no es necesariamente indicio del futuro. Por lo tanto, se pueden identificar dos métodos para asignarle una distribución a una variable que lo amerite:

1. Data histórica
2. Opinión experta

En la literatura se encuentra una investigación donde se le preguntó a 25 expertos su opinión de la distribución de diversas variables<sup>22</sup>, a continuación se muestra la distribución que le asignaron los expertos a las variables que coinciden con los sectores mencionados anteriormente. La variable que coincide es el crecimiento del PIB y la población:

#### i. PIB

La mayoría de los expertos se inclinaron por la distribución normal para la variable PIB, como se muestra en la tabla 17.

Tabla 16 Análisis de expertos para el crecimiento del PIB

Distribución	Porcentaje
Normal	58,3%
Beta	29,16%
Lognormal	4,16%
Gamma	8,3%

Fuente: Elaboración propia

#### ii. Población

No hay una inclinación mayoritaria hacia una distribución en particular, siendo la distribución Beta la con mayor preferencia de los expertos.

<sup>22</sup> An expert elicitation of climate, energy and economic uncertainties". Will Usher, Neil Strachan. Energy Policy 61 (2013) 811-821.

Tabla 17 Análisis de expertos para la población

<b>Distribución</b>	<b>Porcentaje</b>
Beta	33,3%
Gamma	20,83%
Lognormal	25%
Normal	20,83%

Fuente: Elaboración propia

Se elaboraron propuestas para cada una de las variables, las que serán presentadas a continuación.

Variables Globales:

- % crecimiento del PIB:
  - Se cuenta con los datos históricos del crecimiento del PIB en Chile. Se le ajustará una distribución de probabilidad que capture el comportamiento basado en años anteriores, utilizando como caso base o media, la proyección media realizada por MAPS.
- % crecimiento de la población:
  - El crecimiento de la población chilena se comporta como un país desarrollado<sup>23</sup>, por lo que se puede utilizar el enfoque entregado por los expertos mostrados con anterioridad.

Variables de minería:

- Producción de todos los minerales:
  - Para el cobre, se cuentan con las proyecciones realizadas por Cochilco, y sus ponderadores probabilísticos respectivos. Con esto se podrá obtener cuanto se produce anualmente, así como también cuanta producción comienza cada año, para luego analizar la variación de los ponderados. Como no se cuenta con más información, y solo se tienen el mínimo, máximo, y el valor esperado, se plantea una distribución triangular.
  - Para el hierro, éste depende directamente del PIB por lo que la incertidumbre se tratará sobre la variable global.
  - Al resto de los minerales no se le aplicará incertidumbre.
- Ley media de cobre:
  - Al existir diferente ley para los procesos de lixiviado y concentrado, se trabajarán dichas leyes por separado.
  - Se cuentan con 2 escenarios para cada ley, un escenario alto y uno bajo.

<sup>23</sup> Instituto de Políticas Públicas Expansiva UDP, 2010.

- En la realidad ésta depende de cada yacimiento, ya que dado sus dimensiones y calidad de roca, es la ley que tiene. En el modelo, es un promedio de todos los yacimientos presentes en el país, por lo que por ley de grandes números, se propone utilizar una distribución normal en esta variable.

Variables de CPR:

- Número de viviendas:
  - El número de viviendas depende de la población y del ratio habitantes por vivienda. Se cuenta con la proyección de la población dado que el crecimiento en Chile se comporta como un país desarrollado, por lo que su proyección se puede considerar como buena. El ratio habitantes por vivienda depende del crecimiento del PIB, por lo que se puede capturar la incertidumbre de esta variable por ese aspecto.
- Confort térmico:
  - El confort térmico depende directamente del crecimiento del PIB, como también indirectamente a través de sus parámetros, por lo que se espera capturar su incertidumbre al trabajar la que posee el crecimiento del PIB.

Por lo tanto, la propuesta principal para asignar distribuciones de probabilidad es principalmente la siguiente:

- Utilizar los valores históricos cuando se pueda, para capturar su comportamiento, y aplicarlos manteniendo como base los valores ya proyectados dado que fueron realizados por expertos.
- En caso de no contar con escenarios proyectados, tener reuniones con expertos para determinar la distribución de dicha variable, o bien, cómo llegar a ella (trabajando con la historia, generar la proyección a través de la dependencia con otras variables, etc.)

## 6.4 MODELO PROBABILÍSTICO

A continuación se explicarán las variables, por sector, a las que se les asignó una distribución de probabilidad, describiendo la función de distribución específica, cómo se llegó a ella, y los parámetros que ésta posee.

### 6.4.1 Asignación de distribución a las variables

#### 6.4.1.1 Variables globales

Vale la pena recordar que a la población no se le asignará distribución de probabilidad dado que se utilizará la proyección ya calculada por MAPS Chile.

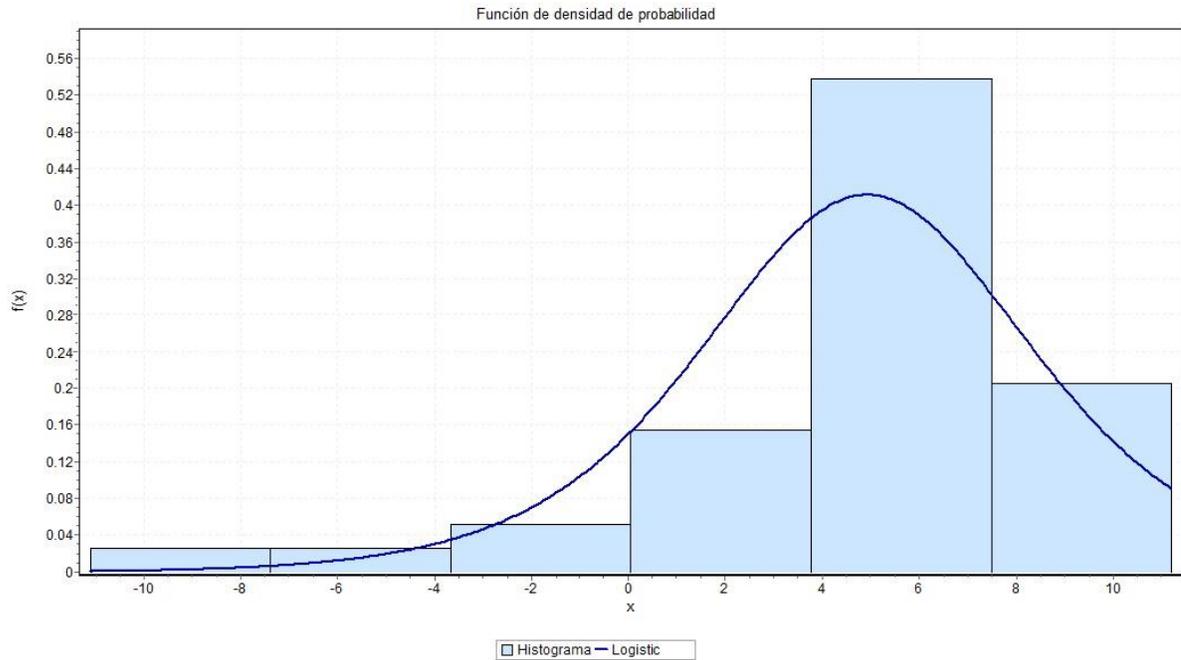
##### 6.4.1.1.1 Crecimiento del PIB

Para asignarle una distribución al crecimiento del PIB, se utilizaron ambos métodos presentados anteriormente. Se aprovechó la opinión experta de MAPS Chile, al utilizar el escenario medio como la media, o localización, de la distribución que se ajustara mejor a la historia.

Utilizando la data histórica del crecimiento del PIB desde 1976 al 2014, valores incluidos en el anexo 11.4, se determinó que la distribución que le ajusta es la logística, con el estadístico de bondad de ajuste de Kolmogorov Smirnov de 0.17514. Su parámetro de escala es 2.2591%. Esta distribución permite capturar los crecimientos o decrecimientos repentinos debido a crisis o booms, las cuales son poco probables, pero aun así posibles. Estas posibilidades no son capturadas con el análisis determinístico realizado por MAPS.

El ajuste respectivo realizado por Easyfit, gráficamente, es el siguiente:

Gráfico 11 Ajuste de distribución logística a data histórica del PIB



#### 6.4.1.2 Sector Industria y Minería

Las variables que repercuten en este sector y se les asignó una distribución de probabilidad fueron:

- Crecimiento del PIB (Variable global)
- Producción de Cobre
- Ley media de cobre

El crecimiento del PIB impacta en la producción del hierro, es por esto que al tratar la incertidumbre del crecimiento del PIB, a su vez se trata también la del hierro.

##### 6.4.1.2.1 Producción de Cobre

El desafío que presenta esta variable es la poca disponibilidad de información. Se cuentan con los valores mínimo, máximo y esperado año a año, y es posible deducir la producción clasificada como nueva cada año a partir del consumo energético y de la información disponible.

Cada año se cuentan con proyectos con distinta clasificación, la que depende de su incertidumbre. Estos son base, probable, posible, potencial, en orden de menor a mayor incertidumbre. Se cuentan

con 3 escenarios (mínimo, máximo y esperado) los que tienen los distintos valores de probabilidad de ocupación de dichos proyectos, es decir, a qué porcentaje de su capacidad máxima se encuentran. Esto sucede principalmente debido a retrasos dentro de las operaciones.

La incertidumbre en esta variable está presente en los ponderadores de probabilidad. Dado que no se cuenta con más información, se utilizó la distribución triangular para absorber dicha incertidumbre considerando la información disponible.

La producción de cobre se obtiene a partir de la capacidad máxima estimada, a la cual se le aplican los ponderadores de probabilidad mencionados anteriormente para obtener la producción esperada año a año.

En el anexo 11.5 se encuentra la información de la capacidad máxima de producción año a año, junto con los vectores de probabilidad para la producción esperada.

#### 6.4.1.2.2 Ley media de Cobre

Para la ley media de cobre, se recurrió a la opinión experta dado que la información histórica no tiene el poder de predicción para el valor futuro, al no estar relacionado. Esto debido a que la manera en que el modelo considera la ley de cobre, es de un promedio de todos los yacimientos en Chile, mientras que la información que se maneja es más desagregada.

Se consultó al director de la carrera de Ingeniería Civil en Minas, y profesor del curso geoestadística, Xavier Emery, de la Universidad de Chile, con respecto a esta variable. Se concluyó de la reunión que esta variable puede seguir una distribución normal, pero que tiene una varianza pequeña, dada la forma en que se considera la ley de cobre. La incertidumbre en esta variable viene dada por el tamaño del yacimiento de cobre, de la roca, y de la calidad de la misma, por lo que al tomar un promedio de todo, se elimina dicha incertidumbre.

Basado en la reunión con el experto, se definió que la distribución de la ley es la distribución normal. Para definir cuál sería la desviación estándar, parámetro necesario para dicha distribución, se utilizó el teorema de Chebyshev. Dado que se tendrá una varianza pequeña, se estipuló que el 95% de los casos se encontrará dentro de los rangos señalados por los distintos escenarios. Con esto, podemos obtener el  $k$  respectivo para la desigualdad de Chebyshev:

$$\begin{aligned} \text{Tenemos que } 0.95 &= 1 - \frac{1}{k^2} \\ \Rightarrow k^2 &= \frac{1}{0.05} \Rightarrow k = 4.472 \end{aligned}$$

Teniendo el valor de  $k$  se tendrá la ecuación para poder despejar la desviación estándar en cada año para la distribución normal, utilizando el valor de la ley para el escenario bajo o alto, dado que el procedimiento es análogo;

$$\begin{aligned} \text{Ley Escenario bajo} &= \mu - k\sigma \\ \sigma &= \frac{\mu - \text{Ley Escenario bajo}}{k} \end{aligned}$$

### 6.4.1.3 Sector CPR

#### 6.4.1.3.1 Número de viviendas

Para obtener el número de viviendas, se necesita conocer el valor de la población y el ratio de habitantes por vivienda, ya que están relacionados de la siguiente manera para cada año  $i$ :

$$\text{Número de viviendas}_i = \frac{\text{Población}_i}{\text{Habitantes por vivienda}_i}$$

La población a utilizar es la proyectada por MAPS Chile, dado que se supone que no debería tener un error considerable dado el comportamiento del crecimiento de la población chilena. Para los habitantes por vivienda es más complejo, dado que dependen de su ratio del año anterior, la elasticidad estimada en el modelo econométrico, fijada en -0.29, y el crecimiento del PIB, por lo tanto su incertidumbre se captura al considerar la incertidumbre del crecimiento del PIB. El ratio se calcula de la siguiente manera, para el año  $t$ :

$$\text{Habitantes por vivienda}_{\text{Chile},t} = \text{Habitantes por vivienda}_{\text{Chile},t-1} * (1 + B * g_t)$$

Donde:

B: Elasticidad obtenida del modelo econométrico (-0.29)

$g_t$ : Crecimiento del PIB para el año  $t$

## 7 RESULTADOS MODELO PROBABILÍSTICO

En consideración de que se cuenta con resultados de la simulación de Montecarlo para cada año, es decir, simulaciones anuales, se mostrarán los resultados del año 2030 para mostrar el año clave que se pretende analizar. Para observar la evolución del crecimiento se entregan los estadísticos de los años 2015, 2020, 2025 y 2030. Para ver la evolución gráfica, ver anexo 11.6, para ambos sectores. Se dará especial énfasis al año 2030, donde se entregarán los intervalos de confianza para el 50%, 75%, 90%, 95% y 99% de las simulaciones.

Se realizaron 100.000 simulaciones del modelo probabilístico, dado que se considera una cantidad por sobre la recomendada, 18.000<sup>24</sup>, y la herramienta tecnológica lo soporta. Se presentan los resultados gráficamente, con su frecuencia y frecuencia acumulada en cada caso. También se observan los estadísticos tales como media, desviación estándar, mínimo, máximo, etc, los que serán tabulados al final de cada sección para observar su cambio a través de los años.

### 7.1.1 Resultados Industria y Minería

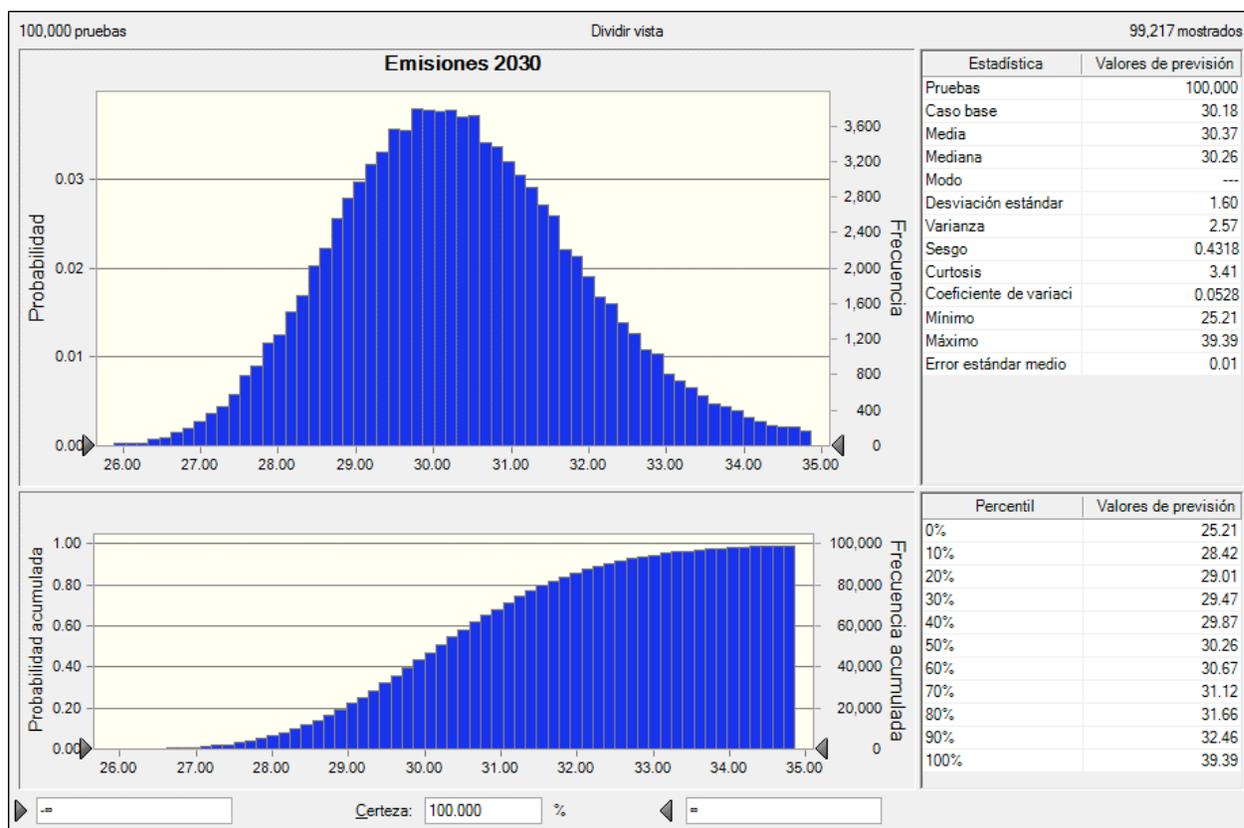
Emisiones de GEI año 2030

A continuación, se muestran los resultados obtenidos por las simulaciones, para el año 2030:

---

<sup>24</sup> 8.5.4 How many runs are enough?, Henrion y Morgan.

Gráfico 12 Resultado Emisiones GEI 2030 Industria y Minería



Se entregan, en la Tabla 18, los percentiles del intervalo de confianza, con sus respectivas emisiones. Estos al final permitirán tomar decisiones de mitigación al respecto, dependiendo del riesgo que se prefiera.

Tabla 18 Intervalos de confianza de emisiones GEI 2030 Industria y Minería

Intervalo de Confianza	Emisiones de GEI (MMtCO <sub>2</sub> eq)
<b>Percentil</b>	
<b>50%</b>	30.26
<b>75%</b>	31.37
<b>90%</b>	32.46
<b>95%</b>	33.17
<b>99%</b>	34.65

La evolución de los estadísticos se puede observar en la siguiente tabla:

Tabla 19 Evolución de los estadísticos de las emisiones de GEI

Estadístico/Año	2015	2020	2025	2030
<b>Media</b>	22.58	26.33	28.16	30.37
<b>Mínimo</b>	20.53	23.31	23.89	25.21
<b>Máximo</b>	24.60	31.31	34.92	39.39

<b>Máximo-Mínimo</b>	4.07	8.00	11.03	14.18
<b>Desviación Estándar (MMtCO<sub>2</sub>eq)</b>	0.41	0.80	1.20	1.60

Se puede apreciar cómo la diferencia entre los valores mínimo y máximo aumenta con el pasar de los años, lo que es esperable debido a la incertidumbre. Además, las emisiones crecen con el pasar de los años, lo que es normal.

### Demanda Eléctrica año 2030

La importancia que tienen los resultados de demanda eléctrica recae en que son el insumo para el sector que más emisión y variabilidad tiene en sus emisiones, el sector de generación eléctrica. Trabajar la incertidumbre en los insumos de dicho sector también es una medida que ayuda a reducir dicha incertidumbre, con el fin de tener una mejor estimación.

Su valor se obtiene directamente del modelo, dado que se puede obtener el consumo de cada energético, siendo uno de estos, la energía eléctrica.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos por las simulaciones, para el año 2030:

Gráfico 13 Resultado Demanda Eléctrica 2030 Industria y Minería

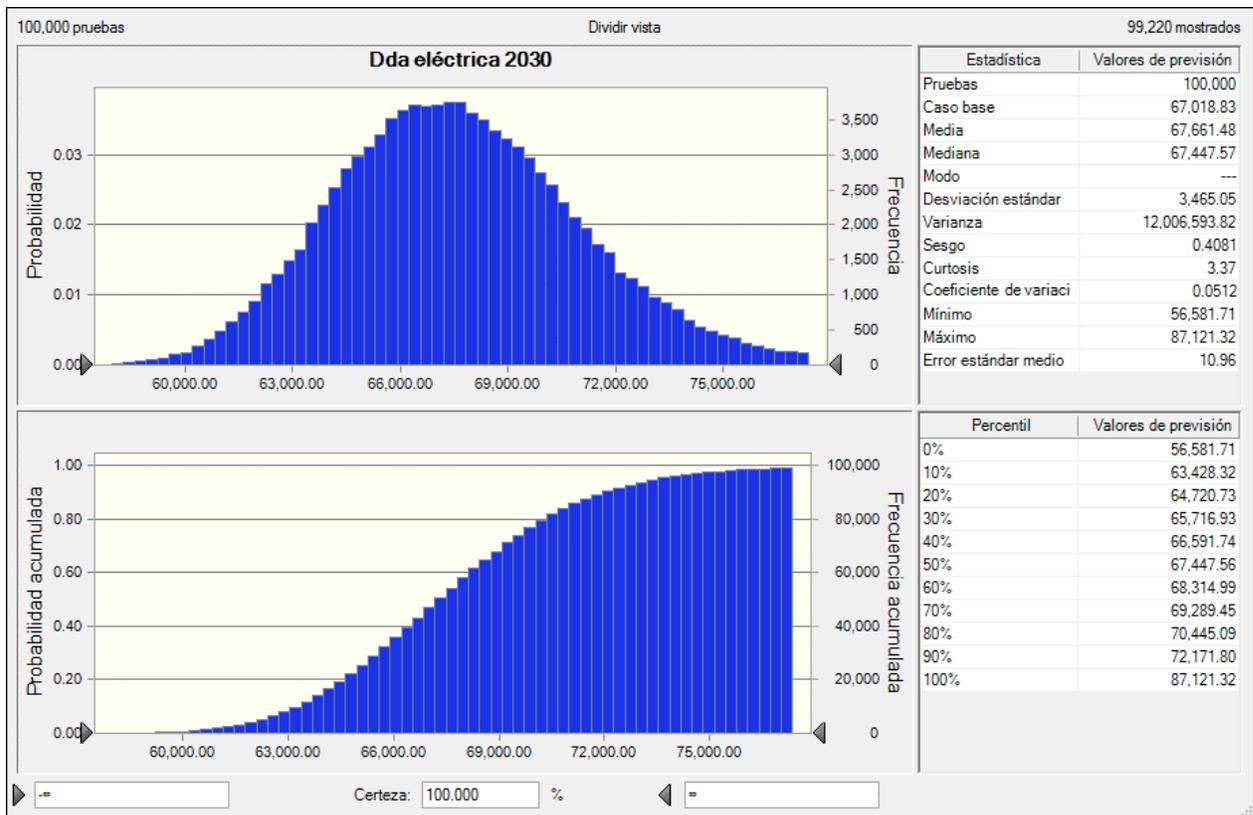


Tabla 20 Intervalos de confianza demanda eléctrica 2030 Industria y Minería

<u>Intervalo de Confianza</u>	<u>Teracal</u>
<b>Percentil</b>	<b>Demanda Eléctrica</b>
<b>50%</b>	67447.56
<b>75%</b>	69829.51
<b>90%</b>	72171.80
<b>95%</b>	73690.82
<b>99%</b>	76890.49

La evolución de los estadísticos se puede observar en la siguiente tabla:

Tabla 21 Evolución de los estadísticos de demanda eléctrica Industria y Minería

<b>Estadístico/Año</b>	<b>2015</b>	<b>2020</b>	<b>2025</b>	<b>2030</b>
<b>Media</b>	43145.61	58301.28	63123.92	67661.48
<b>Mínimo</b>	39313.86	52352.33	53386.05	56581.71
<b>Máximo</b>	46910.75	68776.26	77134.59	87121.32
<b>Máximo-Mínimo</b>	7596.89	16423.93	23748.54	30539.61
<b>Desviación Estándar (teracal)</b>	769.92	1615.23	2570.52	3465.05

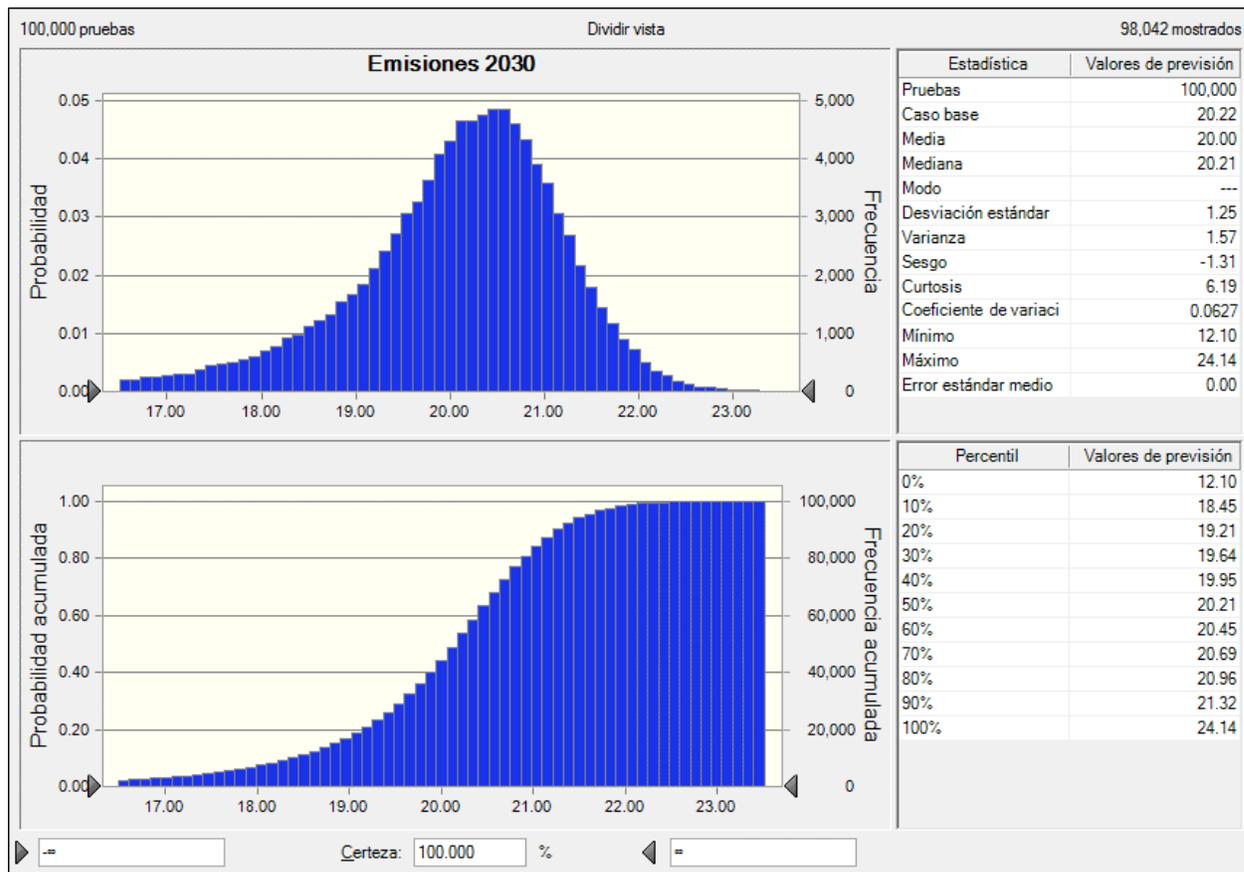
Se puede apreciar cómo la diferencia entre los valores mínimo y máximo aumenta con el pasar de los años, lo que es esperable debido a la incertidumbre.

### 7.1.2 Resultados CPR

Emisiones de GEI para el año 2030

A continuación, se muestran los resultados obtenidos por las simulaciones, para el año 2030:

Gráfico 14 Resultado Emisiones GEI 2030 CPR



Se entregan, en la Tabla 22Tabla 18, los percentiles del intervalo de confianza, con sus respectivas emisiones. Estos al final permitirán tomar decisiones de mitigación al respecto, dependiendo del riesgo.

Tabla 22 Intervalos de confianza de emisiones GEI 2030 CPR

Intervalo de Confianza	Emisiones de GEI (MMtCO <sub>2</sub> eq)
<b>Percentil</b>	
<b>50%</b>	20.21
<b>75%</b>	20.82
<b>90%</b>	21.32
<b>95%</b>	21.63
<b>99%</b>	22.19

La evolución de los estadísticos se puede observar en la siguiente tabla:

Tabla 23 Evolución de los estadísticos de las emisiones de GEI en CPR

Estadístico/Año	2015	2020	2025	2030
<b>Media</b>	8.52	13.67	17.56	20.00
<b>Mínimo</b>	6.26	8.06	10.08	12.10

<b>Máximo</b>	14.99	19.00	21.84	24.14
<b>Máximo-Mínimo</b>	8.73	10.94	11.76	12.04
<b>Desviación Estándar (MMtCO<sub>2</sub>eq)</b>	0.93	1.94	1.66	1.25

Existe una gran diferencia entre los máximos y mínimos, pero la desviación estándar no es muy alta, por lo que se explica por casos poco frecuentes como crecimientos negativos de manera sucesiva del PIB. De todas maneras las emisiones van creciendo.

### Demanda Eléctrica año 2030

Como fue mencionado anteriormente, la importancia que tienen los resultados de demanda eléctrica recae en que son el insumo para el sector de generación eléctrica.

Su valor se obtiene directamente del modelo, dado que se puede obtener el consumo de cada energético, siendo uno de estos, la energía eléctrica.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos por las simulaciones, para el año correspondiente:

Gráfico 15 Resultado Demanda Eléctrica 2030 CPR

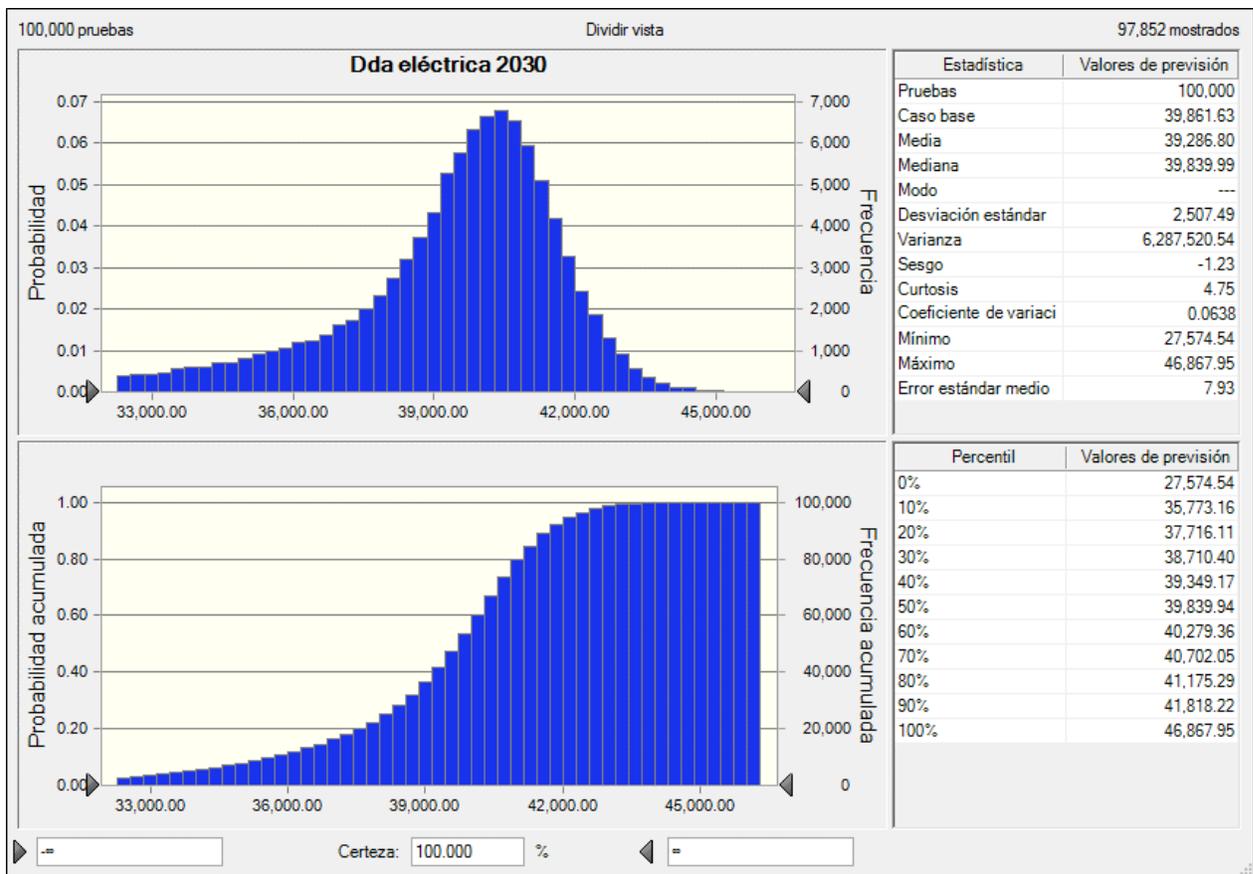


Tabla 24 Intervalos de confianza demanda eléctrica 2030 CPR

<u>Intervalo de Confianza</u>	<u>Gwh</u>
<b>Percentil</b>	<b>Demanda Eléctrica</b>
<b>50%</b>	39839.94
<b>75%</b>	40929.17
<b>90%</b>	41818.22
<b>95%</b>	42364.10
<b>99%</b>	43370.70

La evolución de los estadísticos se puede observar en la siguiente tabla:

Tabla 25 Evolución de los estadísticos de demanda eléctrica, CPR

<b>Estadístico/Año</b>	<b>2015</b>	<b>2020</b>	<b>2025</b>	<b>2030</b>
<b>Media</b>	18556.11	24906.65	32365.44	39286.80
<b>Mínimo</b>	15710.32	19499.29	23565.83	27574.54
<b>Máximo</b>	22900.20	31422.88	39361.68	46867.95
<b>Máximo-Mínimo</b>	7189.99	11923.59	15795.85	19293.41
<b>Desviación Estándar (Gwh)</b>	674.30	1805.08	2575.36	2507.49

Se puede apreciar cómo la diferencia entre los valores mínimo y máximo aumenta con el pasar de los años, lo que es esperable debido a la incertidumbre. Además, la demanda eléctrica crece con el pasar de los años, lo que es normal. Por otro lado, se tiene un crecimiento relativamente constante en la demanda cada 5 años. Se observan que los casos extremos llegan a ser bastante distantes, pero esto se puede explicar por los casos consecutivos de bajo o alto crecimiento del PIB, que terminan siendo casos aislados, al compararlos con la media.

## 8 COMPARACIÓN ENTRE MODELOS DETERMINÍSTICO Y PROBABILÍSTICO

Contando con los resultados entregados por el modelo probabilístico, es posible realizar la comparación, y posterior análisis con respecto al modelo determinístico replicado. Se compararán los resultados del año 2030, dado que es el año clave para el tomador de decisiones.

La finalidad de esta comparación, en primera instancia, es verificar la coherencia de los resultados, ya que se espera que la media del modelo probabilístico esté dentro de los rangos de los escenarios determinísticos, así como también analizar el intervalo de confianza en el que se encuentran los escenarios determinísticos, al realizar el análisis probabilístico, y cuán lejos están de los intervalos considerados como confiables (sobre el 95% o 99% de confianza).

### 8.1 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

#### 8.1.1 Sector Industria y Minería

Para el año 2030, los resultados determinísticos de las emisiones de GEI fueron los siguientes:

Tabla 26 Resultados determinísticos para el 2030 de emisiones en Industria y Minería

<b>Emisiones</b>	<b>2030</b>
<b>Escenario Alto</b>	33.97
<b>Escenario Medio</b>	31.34
<b>Escenario Bajo</b>	29.27

En el modelo probabilístico la media es de 30.37, por lo que se encuentra dentro del rango esperado. El percentil del escenario bajo se encuentra sobre el 25% (29.25) del modelo probabilístico, el escenario medio se encuentra cerca del 75% (31.37), mientras que el escenario alto está entre el 95% (33.17) y el 99% (34.65).

Esto significa que la probabilidad de que las emisiones, para el año 2030, en el sector de Industria y Minería, sean menores a los 33.97 MMtCO<sub>2</sub>eq, es por lo menos de un 95%, lo que corresponde al caso del escenario alto. Análogamente, que las emisiones sean menores a las estimadas por el escenario medio determinístico, ocurrirá con un 75% de probabilidad. Sólo con probabilidad de un 25% se darán las emisiones estimadas por el escenario bajo.

Al comparar los resultados de la demanda eléctrica, tenemos que para el año 2030, los resultados determinísticos de demanda eléctrica fueron los siguientes:

Tabla 27 Resultados determinísticos para el 2030 de demanda eléctrica en Industria y Minería

<b>Demanda Eléctrica</b>	<b>2030</b>
<b>Escenario Alto</b>	78073.22
<b>Escenario Medio</b>	71642.27
<b>Escenario Bajo</b>	66368.71

En el modelo probabilístico, para el mismo año la media es de 67,661.48, por lo que se encuentra dentro del rango esperado. El percentil del escenario bajo se encuentra bajo el 40% (66591.74) del modelo probabilístico, el escenario medio se encuentra bajo el 90% (72171.80), mientras que el escenario alto se encuentra entre el 99% (76890.49) y 100% (87121.32).

Esto significa que la probabilidad de alcanzar la demanda eléctrica estimada por el escenario alto, para el año 2030, en el sector de Industria y Minería, será del 99%. Análogamente, con probabilidad de ocurrencia de un 90% aproximadamente, se tendrá el nivel de demanda eléctrica estimada en el escenario medio. La demanda eléctrica del escenario bajo se daría con probabilidad de 40%.

### 8.1.2 Sector CPR

Para el año 2030, los resultados determinísticos de las emisiones de GEI fueron los siguientes:

Tabla 28 Resultados determinísticos para el 2030 de emisiones, CPR

<b>Emisiones</b>	<b>2030</b>
<b>Escenario Alto</b>	21.66
<b>Escenario Medio</b>	20.22
<b>Escenario Bajo</b>	18.86

En el modelo probabilístico, para el mismo año la media es de 20.00, por lo que se encuentra dentro del rango esperado. El percentil del escenario bajo no supera el 15% (18.90) del modelo probabilístico, el escenario medio apenas supera el 50% (20.21), mientras que el escenario alto se encuentra sobre al 95% (21.63), siendo menor al máximo (24.14).

Esto significa que la probabilidad de que las emisiones estimadas por el escenario alto, para el año 2030, en el sector CPR, sean menores a los 33.97 MMtCO<sub>2</sub>eq, es por lo menos de un 95%. Análogamente, que las emisiones sean menores a las estimadas por el escenario medio determinístico, ocurrirá con un 50% de probabilidad. Sólo con probabilidad de un 15% se darán las emisiones estimadas por el escenario bajo.

Al comparar los resultados de la demanda eléctrica, tenemos que para el año 2030, los resultados de demanda eléctrica fueron los siguientes:

Tabla 29 Resultados determinísticos para el 2030 de demanda eléctrica, CPR

<b>Demanda Eléctrica</b>	<b>2030</b>
<b>Escenario Alto</b>	43887.77
<b>Escenario Medio</b>	39861.63
<b>Escenario Bajo</b>	37438.59

En el modelo probabilístico, para el mismo año la media es de 39286.80, por lo que se encuentra dentro del rango esperado. El percentil del escenario bajo supera el 15% (36919.57) del modelo probabilístico, el escenario medio se encuentra sobre el 50% (39839.94), mientras que el escenario alto se encuentra sobre el 99% (43409.16), sin superar el máximo que es de 46867.95.

Esto significa que la probabilidad de alcanzar la demanda eléctrica estimada por el escenario alto, para el año 2030, en el sector CPR, será del 99%. Análogamente, con probabilidad de ocurrencia de un 50% aproximadamente, se tendrá el nivel de demanda eléctrica estimada en el escenario medio. La demanda eléctrica del escenario bajo se daría con probabilidad de un 15%.

## 8.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

### Industria y Minería

Se observa un comportamiento similar tanto en las proyecciones de la línea base de emisiones de GEI como en las proyecciones de demanda eléctrica.

Tanto para emisiones de GEI como demanda eléctrica, el escenario bajo es poco probable que ocurra. Un 25% y un 40% son considerados muy bajo para afectar la toma de decisiones, ya que existe mayor probabilidad de que se dé un escenario mayor a lo que estiman, perjudicando al tomador de decisiones en caso de que hubiera confiado en esas estimaciones. Se daría un escenario de mayor cantidad de emisiones de GEI, y al no haber tomado medidas de mitigación correspondientes a dicho nivel de emisiones, no podrá cumplir con su promesa de reducción de emisiones. Lo relevante es que existen escenarios en el modelo probabilístico, por debajo del escenario bajo determinístico, lo que plantea la interrogante de si el escenario bajo, será realmente el escenario más bajo posible, o dado que no se captura de manera eficiente el comportamiento de las variables, no se consideran casos extremos. Los resultados demuestran que se dejan de considerar casos extremos al realizar un análisis determinístico.

Los escenarios medios no entregan información de confianza, ya que, por lo general, se exige un nivel de certeza por sobre el 95% o el 99% para considerar la información entregada como útil. Para el 2030 la probabilidad de alcanzar el nivel de emisiones de GEI no supera el 75%, mientras que el nivel de demanda eléctrica será alcanzado con un 90% de probabilidad.

En el caso de los escenarios altos, estos ocurrirán con un alto grado de probabilidad. Ambos permiten asumir el valor de la información de resultados por sobre el 95% de confianza para el 2030. Además, plantean que pueden existir situaciones aún más extremas que las capturadas por el escenario alto. Esto nos dice que solamente los escenarios proyectados altos, están entregando información con alto grado de certeza, por lo que las medidas y acciones deberían hacerse con respecto a los escenarios altos, y no confiar en los otros escenarios estimados.

### CPR

Tanto los escenarios bajos como medios determinísticos, no son capaces de entregar información de confianza para llevar a cabo acciones al respecto. Tanto para GEI como demanda eléctrica, la probabilidad de ocurrencia del escenario medio es aproximadamente 50%, lo que se considera bajo dado que se suele exigir sobre el 95% de certeza de información. Entonces, como ya fue mencionado anteriormente, si se llegaran a tomar acciones basándose en estos escenarios, es probable que se den situaciones que se escapan de ellos, perjudicando al tomador de decisiones.

El caso de los escenarios altos es distinto. Si se le exige un 95% de certeza a la información, ambos entregan información relevante, ya que cumplen con dicha exigencia. Es más, la estimación del escenario alto de la demanda eléctrica permite que se le exija por sobre el 99%, por lo tanto, se puede tener la certeza, al 95%, que sucederá lo estimado en estos casos, lo que permite tomar acciones con información más confiable basándose en escenarios altamente probables.

Al igual que en el sector Industria y Minería, existen casos extremos que superan la barrera de los escenarios bajo y alto, lo que da a entender que dichos escenarios no son capaces de capturar, en

su totalidad, el comportamiento de las variables que lo componen, y existe la posibilidad, por baja que sea, de enfrentarse a situaciones no consideradas con anterioridad.

### 8.3 ANÁLISIS DE IMPORTANCIA

Luego de haber realizado el análisis de los resultados del modelo probabilístico, y contrastarlos con los del modelo determinístico, es importante identificar qué variable influye más en los respectivos resultados, para enfocar esfuerzos en poder tener más información al respecto de ella.

Esto puede ser motivado por limitaciones de recursos, por lo que es necesario tener la mayor información con respecto a la variable que más variabilidad aporta a las estimaciones de GEI o de la demanda eléctrica, dependiendo de lo que se busca.

Para ello se realizó un análisis de importancia<sup>25</sup> mediante el complemento Crystal Ball, llamado análisis de tornado, que varía, una a una, las variables señaladas y entrega el análisis de importancia de cada una con respecto al resultado final que uno señala.

Este análisis se centrará en el año 2030, dado que es el año límite al que Chile se comprometería a bajar sus emisiones. Se analizará cada sector por separado, al igual que se discriminará entre emisiones de GEI y demanda eléctrica. Esto último ya que dependiendo del tomador de decisiones, puede decidir enfocarse en uno o el otro, y puede resultar que la variable que más incida en su variabilidad sea distinta.

En este caso, se realizó para cada variable una variación del +-20% de su media, y así observar sus efectos en las emisiones de GEI y demanda eléctrica del año 2030.

#### 8.3.1 Industria y Minería

##### 8.3.1.1 Emisiones de GEI

Los resultados para las emisiones de GEI en el sector Industria y Minería son los siguientes:

Tabla 30 Valores del análisis de importancia de emisiones de GEI para Industria y Minería

Variable de entrada	Hacia abajo	Hacia arriba	Rango
Población 2030	28.36	32.06	3.69
LeyConc 2030	31.50	29.37	2.13
LeySxEw 2030	31.26	29.53	1.73
Potencial: Factibilidad	29.88	30.56	0.68
Base: Ejecución	29.91	30.53	0.61
Posible: Factibilidad	30.03	30.40	0.37
Potencial: Prefactibilidad	30.19	30.25	0.06
Probable: Factibilidad	30.20	30.24	0.04
Posible: Prefactibilidad	30.20	30.24	0.03

<sup>25</sup> “The tornado chart tool can be especially useful in determining which model variables are the most important inputs”.

<http://www.oracle.com/technetwork/middleware/crystalball/overview/tornado-analysis-tool-131028.pdf>

Se observa que para las emisiones, las variables de mayor importancia son la población para el 2030, y la ley media de concentrado y lixiviado.

### 8.3.1.2 Demanda Eléctrica

Los resultados para la demanda eléctrica en el sector Industria y Minería son los siguientes:

Se observa la misma tendencia para la demanda eléctrica, la variable de mayor importancia es la ley del concentrado de cobre. La variación de los valores se puede observar en la siguiente tabla:

Tabla 31 Valores del análisis de importancia de demanda eléctrica para Industria y Minería

Variable de entrada	Hacia abajo	Hacia arriba	Rango
LeyConc 2030	73,380.74	63,228.42	10,152.32
Población 2030	63,394.58	71,156.74	7,762.15
LeySxEw 2030	69,083.12	66,093.51	2,989.61
Potencial: Factibilidad	66,138.00	68,440.71	2,302.71
Base: Ejecución	66,249.06	68,329.65	2,080.59
Posible: Factibilidad	66,660.59	67,918.12	1,257.53
Potencial: Prefactibilidad	67,191.68	67,387.02	195.33
Probable: Factibilidad	67,225.64	67,353.06	127.42
Posible: Prefactibilidad	67,233.13	67,345.57	112.43

Se observa la misma tendencia para la demanda eléctrica, con la única variación que la ley de concentrado supera a la población.

Para la presentación gráfica del análisis de importancia, ver anexo 11.7.

### 8.3.2 CPR

Para el sector CPR no se realizó análisis de importancia, dado que se modeló el sector con una única variable, la que es el crecimiento del PIB. Si bien el número de viviendas se considera como una variable en el sector, su variación depende directamente del PIB por lo que no es posible realizar el análisis.

## 9 CONCLUSIONES

El objetivo principal de esta memoria es evaluar el uso de modelos probabilísticos en la estimación de las trayectorias de emisiones de gases de efecto invernadero en Chile. Para ello se basó en el modelo utilizado por MAPS Chile, replicándolo para luego crear un modelo probabilístico que pudiese entregar resultados más confiables que los que entrega un análisis de escenarios. Para tales efectos, se analizaron las emisiones de gases de efecto invernadero y demanda eléctrica de los sectores a trabajar para observar cambios relevantes.

Fue necesario replicar el modelo MAPS para poder construir el modelo probabilístico. El modelo replicado fue validado al obtener resultados semejantes, tanto en emisiones de GEI como demanda eléctrica, para ambos sectores trabajados. Además, los resultados entregados por el modelo replicado, año a año, se comportaban de la misma manera que el modelo original.

Para poder cumplir lo mencionado anteriormente, se utilizaron 2 herramientas computacionales. Primero que todo se utilizó el complemento de Excel, Crystal Ball, para llevar a cabo simulaciones de Montecarlo, además se apoyó en el software Easyfit, para poder ajustar distribuciones a variables en caso de ser necesario. Fue necesario identificar las variables claves de cada sector, y ver la factibilidad de asignarles distribución de probabilidades. Se observó que los resultados, tanto de emisiones como de demanda eléctrica, sufrieron variaciones a considerar en las simulaciones, es decir, el valor de los resultados no fue siempre el mismo, por lo que es posible concluir que las variables fueron elegidas de manera correcta al presentar incertidumbre en ellas.

Se trabajó sobre los sectores Industria y Minería, y comercial, público y residencial. Para el primero se le asignó distribución al crecimiento porcentual del PIB, la ley media de cobre y la producción de cobre. Los resultados obtenidos para el año 2030 no se alejan de los obtenidos por los escenarios determinísticos. En el caso del sector Industria y Minería, la media del modelo probabilístico para las emisiones de GEI se centró en 30.37 MMtCO<sub>2</sub>eq, mientras que el escenario determinístico medio estima 30.18 MMtCO<sub>2</sub>eq, teniendo como escenarios alto y bajo, 32.68 MMtCO<sub>2</sub>eq y 28.27 MMtCO<sub>2</sub>eq respectivamente. Para la demanda eléctrica del mismo sector, se obtuvo que la media del modelo probabilístico es de 67661.48 teracalorías, mientras que el escenario medio determinístico está evaluado en 67018.83 teracalorías, teniendo como escenarios alto y bajo, 73102.02 teracalorías y 62217.44 teracalorías respectivamente. La diferencia es que entrega información más valiosa, al tener la probabilidad de llegar a cierto nivel de emisiones de GEI y demanda eléctrica. Es más, se consideran casos en los que la proyección inicial no consideró, como valores intermedios de las variables, o los efectos de posibles crisis o años de gran crecimiento, lo que le agrega valor a la estimación. De manera análoga se realizó para el sector comercial, público y residencial. Las variables que fueron consideradas para este sector fueron el número de viviendas y el crecimiento porcentual del PIB. Para el año 2030 se obtuvo buenos resultados, llegando a poder explicar el escenario determinístico alto con más del 95% de confianza. Las emisiones de GEI para dicho año tuvieron una media de 20.00 MMtCO<sub>2</sub>eq, mientras que el escenario medio estuvo en 20.22 MMtCO<sub>2</sub>eq, teniendo los escenarios alto y bajo en 21.66 MMtCO<sub>2</sub>eq y 18.86 MMtCO<sub>2</sub>eq respectivamente. Para la demanda eléctrica de dicho año la media fue 39286.8 Gwh, mientras que el escenario medio estuvo en 39861.63.

Estos resultados entregados por el modelo probabilístico se pueden considerar, a lo menos, lógicos, dado que su media se encuentra dentro de los escenarios proyectados, cercanos al escenario medio, lo que es un buen indicador a la hora de evaluar la validez del modelo. Además, si se le exige un 95% de certeza a la información, sólo los escenarios altos son capaces de cumplir con lo requerido,

dejando como escenarios no confiables a los escenarios medio y bajo. En caso de ser aún más exigentes con la información, no todos los escenarios altos son capaces de cumplir con el 99% de confianza, lo que muestra que realizar un análisis probabilístico aporta valor a las estimaciones.

Entonces, ¿entrega este nuevo enfoque, información de mejor calidad que el análisis por escenarios? La respuesta a esta pregunta es sí. Captura comportamientos de las variables que van más allá de 3 escenarios, hasta es posible capturar situaciones de muy baja probabilidad de ocurrencia. Permite comprometerse con un grado de disminución de emisiones, dependiendo del grado de confianza que se pretende asumir en las predicciones. Se observan que las proyecciones del escenario determinístico medio, que viene a ser el escenario neutro, y el publicado de manera online, en muchos casos no supera el 50% de confianza en los análisis, lo que es preocupante pensando en el dinero adicional que se puede gastar en medidas de mitigación que no serán las óptimas para cumplir con lo prometido. Éste análisis es capaz de entregar la información al nivel de certeza requerido, que por lo general es del 95% o 99%, valores que escapan del análisis determinístico.

Existen variables más importantes que otras en lo que a incertidumbre refiere. Realizando un análisis de importancia, basado en el análisis de sensibilidad permitió identificar dichas variables. Para el caso del sector de Industria y Minería, las leyes de concentrado de cobre y lixiviado, junto a la población, son las que tienen mayor importancia, tanto para las emisiones como para la demanda eléctrica. El análisis no se pudo aplicar para el sector CPR debido a la forma en que se modeló.

Para mejorar aún más los resultados obtenidos, trabajos futuros deberían apuntar a 2 frentes, independientes entre sí, pero complementarios:

1.- Desagregar la información posible, esté esta capturada en supuestos, variables, o parámetros. Por ejemplo, en este trabajo, la variable que destaca más en este punto es la ley media de cobre, que debido a como fue definida en un principio es que se le asignó una distribución específica, siendo que en la realidad esta puede diferir en una cantidad a considerar entre yacimientos, por lo que debería hacerse un estudio centrado en la ley de cobre, separando por yacimientos existentes. El problema de esto, es que es mucho trabajo, para un beneficio desconocido, por lo que sería necesario antes estimar el beneficio de realizarlo, para decidir si se realiza.

2.-Identificar otras variables relevantes. Si bien se encontraron variables relevantes en el presente trabajo, debido a la opinión experta, hace falta experimentar para encontrar otras variables. Es decir, asumir que ciertas variables podrían ser importantes, y hacer el estudio respectivo y concluir si son importantes o al final no tienen relevancia alguna para los resultados finales. Por ejemplo, para este trabajo se podría estudiar la influencia de la intensidad energética dentro de las emisiones de GEI.

## 10 BIBLIOGRAFÍA

An expert elicitation of climate, energy and economic uncertainties”. Will Usher, Neil Strachan. *Energy Policy* 61 (2013). Pp 811-821.

Communicating uncertainty in the IPCC’s greenhouse gas emissions scenarios, Niels J. Schenk & Sander M. Lensink.

Henrion y Morgan, *Uncertainty: A guide to dealing with uncertainty in Quantitative Risk and Policy Analysis*.

GHG emission factors developed for the collection, transport and landfilling of municipal waste in south african municipalities”. Elena Friedrich, Cristina Trois. *Waste Management* 33 (2013), 1013-1026.

MAPS Chile (2013), fase 1.

MAPS Chile (2014), fase 2.

National Greenhouse Gas Emissions Baseline Scenarios: Learning from Experiences in Developing Countries. 2013. Report.

O’Ryan, Raúl y Diaz, Manuel, (2008), “The Use Of Probabilistic Analysis to Improve Decision-Making In Environmental Regulation in A Developing Context: The Case Of Arsenic Regulation In Chile”, *Human and Ecological Risk Assessment*, 14:3, 623-640.

PROJECTING EMISSIONS BASELINES FOR NATIONAL CLIMATE POLICY: OPTIONS FOR GUIDANCE TO IMPROVE TRANSPARENCY. Christa Clapp and Andrew Prag (OECD). November 2012.

Setting greenhouse gas emission targets under baseline uncertainty: the Bush Climate Change Initiative, Neil Strachan. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change (Impact Factor: 1.86)*. 04/2007; 12(4):455-470. DOI:10.1007/s11027-007-9088-3.

Simoes, S., et al., Assesing effects of exogenous assumptions in GHG emissions forecasts – a 2020 scenario for Portugal..., *Technol. Forecast. Soc. Change* (2014).

Uncertainty Analysis of Emission Estimates for Selected Sectors. Prepared for: Environment Canada. February 2012.

World Resources Institute (WRI) and World Business Council for Sustainable Development. 2004. *The Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard*, revised edition. WRI/WBCSD, Washington D.C.

## 11 ANEXO Y APÉNDICE

### 11.1 ANEXO A: UNIDADES DE MEDICIÓN PARA GEI

- Las emisiones se miden en MMtCO<sub>2</sub>eq (millones de toneladas métricas de dióxido de carbono equivalente), para poder agruparlas y comparar magnitudes.
- Dióxido de carbono equivalente: Es una medida universal de medición utilizada para indicar la posibilidad de calentamiento global de cada uno de los gases con efecto invernadero.
- Existen factores de emisión establecidos internacionalmente, para distintos energéticos, pero también pueden ser calculados de manera nacional.<sup>26</sup>

### 11.2 ANEXO B: Detalle de cálculo de emisiones de GEI y de demanda eléctrica de sector minería

Para calcular las emisiones se analizan por separados los siguientes subsectores:

- Gran minería del cobre y subproductos
- Resto de la minería
- Industrial e industrias y minas varias
- Procesos industriales

#### Sector gran minería del cobre y subproductos:

##### Consumo energético

Para calcular la cantidad de material a procesar, es necesario poder proyectar la producción de cobre fino y la ley media de las minas de cobre, así como también la tasa de recuperación del mineral. La primera se obtiene a partir del concentrado de cobre, cátodos ER obtenidos del proceso de fundición y cátodos EO obtenidos del proceso SX-EW.

Con esto, el mineral procesado se calcula de la siguiente manera:

$$\mathbf{Mineral\ Procesado = Cobre\ fino / (Ley\ Media * Recuperación)}$$

Adicionalmente, se calcula la intensidad energética para cada año, como el cociente entre consumo de energía por producción de cobre fino. Esta intensidad considera tanto la energía de electricidad como al de combustibles.

#### Sector resto de la minería:

- Industrias incluidas en este sector:
- Hierro
- Salitre

---

<sup>26</sup> GHG emission factors developed for the collection, transport and landfilling of municipal waste in south african municipalities". Elena Friedrich, Cristina Trois. Waste Management 33 (2013), 1013-1026.

- Minas varias

Variables que afectan el consumo energético:

- Producción/extracción de cada mineral
- PIB regional de las zonas relacionadas con la industria
- PIB nacional
- PIB internacional de los principales importadores de los productos

Para poder proyectar la variable de producción (variable principal), se desarrolló un modelo econométrico.

Cuentan con las tendencias a largo plazo en los distintos sectores, de los distintos consumos energéticos, en función de las variables que afectan el consumo energético del sector o subsector respectivo.

Con esto es posible calcular las intensidades para los distintos energéticos utilizados, utilizando las participaciones de combustibles más la producción sectorial para cada año.

Sector industrial e industrias y minas varias:

Involucra las siguientes industrias:

- Papel y celulosa
- Cemento
- Azúcar
- Pesca
- Petroquímica
- Siderurgia
- Industrias varias

Nuevamente las variables importantes son proyectadas a través de un modelo econométrico, dado que son necesarias para estimar el consumo energético. Se utilizan desagregadas para cada sector y uso.

Sector procesos industriales:

Las emisiones de este subsector vienen dadas por:

- Utilización de energía en procesos productivos
- Transformación física y química de materias primas

Emisiones se obtienen de la siguiente manera:

$$\textit{Emisiones} = \textit{Producción del sector} * \textit{Factor de emisión}$$

Los factores de emisión utilizados corresponden a los indicados por las directrices IPCC 2006 para las emisiones por procesos industriales.

En las emisiones del sector cemento se incluyen las emisiones de la producción de cemento y cal.

### 11.3 ANEXO C: Detalle de cálculo de emisiones de GEI y de demanda eléctrica de sector CPR

Se analiza el sector residencial de manera independiente del resto de los sectores

#### **Sector Residencial**

##### Consumo energético

La proyección de consumos energéticos para cada uno de los subsectores comercial, público y residencial se realizó mediante un enfoque bottom-up.

Se estimaron los consumos específicos de cada subsector. Para la proyección de los consumos energéticos del sector residencial se considera la vivienda como la variable clave para determinar la evolución del sector.

También es importante considerar otras variables que podrían influir en la proyección del consumo energético del sector. Para esto se analizan las siguientes subcategorías:

- Zona térmica a la que pertenece la vivienda: Para efectos de este análisis, se separa en tres categorías geográficas, con distintas condiciones de clima y demanda energética:
  - Zona A (Norte-Centro Norte): compuesta por las zonas térmicas 1 y 2.
  - Zona B (Centro Sur – Sur): compuesto por las zonas térmicas 3, 4 y 5.
  - Zona C (Sur -Austral – Cordillera): compuesto por las zonas térmicas 6 y 7.
- Tipología constructiva de vivienda: Se separan las viviendas de acuerdo a su tipología constructiva en dos grupos; viviendas unifamiliares (aislada, pareada o en fila), y viviendas multifamiliares.
- Zona urbana o rural. Este criterio permite estimar los consumos energéticos derivados de las proyecciones de centralización de las viviendas (existe tendencia a migrar a zonas urbanas), y por otro lado, permite hacer proyecciones separadas del consumo de leña, que corresponde al principal energético del sector residencial.
- Ubicación geográfica respecto al sistema interconectado (SIC o SING): La separación de las viviendas de acuerdo a los dos sistemas interconectados principales, permitirá especialmente en el caso del consumo eléctrico residencial, obtener las demandas eléctricas para cada sistema por separado.

Las variables principales del sector son PIB y población, ya que ayudan a explicar la proyección de viviendas, además de otras características.

Otra variable relevante es el número de habitantes por vivienda. Considera tendencias históricas de habitantes/viviendas en cada región.

Luego, a partir de la información entregada por el estudio CDT (2010), se estiman usos finales y consumos unitarios, los que fueron ajustados de acuerdo a la información entregada por el Balance Nacional de Energía del 2012.

En este sector, las características de tenencia y uso de artefactos son las que definen finalmente el consumo de los energéticos. Se asume que la tecnología determina el combustible, y su precio sólo afecta al uso de la tecnología y no su reemplazo para un mismo uso final. Para inferir el consumo

de energía para el horizonte de evaluación, se procede a separar el consumo de acuerdo a las siguientes categorías:

- Calefacción
- Artefactos eléctricos
- Agua caliente sanitaria y cocina

Es importante considerar que los hogares que alcanzan el confort térmico se mantienen en este nivel, conservándose el mismo consumo energético por m<sup>2</sup>, debido a que los hogares no necesitan más energía.

Los usos finales de calefacción, ACS y cocina tienen la posibilidad de usar distintos combustibles, para lo cual se proyecta los combustibles que serán usados, y cuáles serán reemplazados.

#### Emisiones

Para estimar las emisiones de GEI asociadas al uso energético del sector residencial se utilizan los factores de emisión por defecto para la combustión estacionaria presentados en las directrices del IPCC de 2006. Se consideran los siguientes GEI: dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) y óxido nitroso (N<sub>2</sub>O).

### **Sector comercial y público**

#### Consumo energético

Los sectores comercial y público están pobremente caracterizados y existe básicamente información agregada a nivel nacional. Son conocidas las estimaciones totales de consumos energéticos y se han caracterizado subsectores como establecimientos educacionales, asistenciales, y algunas actividades del retail. La proyección de consumos y emisiones se realizó para cada uno de los segmentos considerados, para luego obtener el crecimiento total del subsector correspondiente.

El parque total de unidades representativas de cada segmento, se proyecta de acuerdo a la caracterización inicial de cada uno de éstos para todas las regiones del país. En base a este stock de unidades representativas, se proyecta el parque futuro en base a indicadores referentes a otros países que presentan un nivel de PIB mayor al caso chileno. A continuación se muestran los indicadores de unidades-habitante para cada segmento y el país al que corresponde el dato

Para el segmento de universidades, se consideró que el parque actual de sedes universitarias se mantendrá constante en el tiempo. En cuanto al segmento de hoteles, también se considera que no existirá una expansión en el número de unidades en el tiempo.

Por medio de los indicadores señalados anteriormente, se obtiene el número de unidades en el año en que el país alcanza los niveles de ingreso correspondiente al país con que se está realizando la comparación. El cálculo del stock para tal año se realiza basado en la siguiente relación:

$$N_{s,r,p} = H_{r,p} \cdot I_s$$

Donde:

$N_{s,r,p}$ , = Número de unidades para el segmento s, en la región r y en el año p donde se alcanza el PIB del país comparado.

$H_r$ ,=Número de habitantes en la región r y en el año p donde se alcanza el PIB del país comparado.

$I_s$ = Indicador de habitantes-unidades para el segmento s.

Una vez obtenido el stock de unidades para el año donde Chile alcanza el nivel de PIB de los respectivos países comparados, se proyecta de forma lineal el stock inicial y a partir del año en que el país alcanza este valor de PIB, el stock llega a un valor constante. A partir de lo anterior se obtienen los consumos energéticos. Este cálculo se realiza por medio del consumo específico de cada unidad y su tamaño medio, a partir de la siguiente relación:

$$C_{s,r,t} = N_{s,r,t} \cdot CEs \cdot Ts$$

Dónde:

$C_{s,,}$ = Consumo de energía en el segmento s, en la región r y para el año t.

$N_{s,,}$ = Número de unidades del segmento s, en la región r y en el año t.

$CEs$ =Consumo específico de energía por unidad de área, para el segmento s. A partir de referencias nacionales e internacionales.

$Ts$ = Tamaño medio de una unidad del segmento s.

Esta variable permite conocer el consumo energético total de cada segmento, pero no entrega los diversos consumos energéticos por uso final y por combustible. Para obtener la proyección de usos finales para cada segmento, se asume que su distribución para el año base no cambia en el tiempo.

Finalmente, se asignan los valores restantes para calzar los resultados de la suma de los segmentos con el valor del BNE 2012. Se asumió que los segmentos de otro comercio y edificios públicos absorberán esta incertidumbre. El crecimiento del consumo energético para cada combustible de estos segmentos, se proyectó de acuerdo al consumo de combustibles histórico de los subsectores comercial y público, y al crecimiento del PIB.

## Emisiones

Para estimar las emisiones de GEI asociadas a uso energético del sector comercial y público se utilizan los factores de emisión por defecto para la combustión presentados en las directrices del IPCC de 2006. Se consideran los siguientes GEI: dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) y óxido nitroso (N<sub>2</sub>O).

### 11.4 ANEXO D: Serie de crecimiento de PIB (millones de pesos) utilizada como base. Referencia del año 2008.

<b>Año</b>	<b>1976</b>	<b>1977</b>	<b>1978</b>	<b>1979</b>	<b>1980</b>	<b>1981</b>	<b>1982</b>	<b>1983</b>	<b>1984</b>	<b>1985</b>
<b>% crecimiento</b>	3.7	10.3	7.8	8.6	8.2	6.7	-11.1	-5.4	4.0	4.3
<b>Año</b>	<b>1986</b>	<b>1987</b>	<b>1988</b>	<b>1989</b>	<b>1990</b>	<b>1991</b>	<b>1992</b>	<b>1993</b>	<b>1994</b>	<b>1995</b>
<b>% crecimiento</b>	5.4	6.5	7.3	10.0	3.4	7.8	11.2	6.8	5.0	9.0
<b>Año</b>	<b>1996</b>	<b>1997</b>	<b>1998</b>	<b>1999</b>	<b>2000</b>	<b>2001</b>	<b>2002</b>	<b>2001</b>	<b>2002</b>	<b>2003</b>
<b>% crecimiento</b>	6.8	7.1	4.1	-0.5	5.1	3.3	2.7	3.3	2.7	3.8

<b>Año</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>2009</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>
<b>% crecimiento</b>	7.0	6.2	5.7	5.2	3.3	-1.0	5.8	5.8	5.5	4.2
<b>Año</b>	<b>2014</b>									
<b>% crecimiento</b>	1.9									

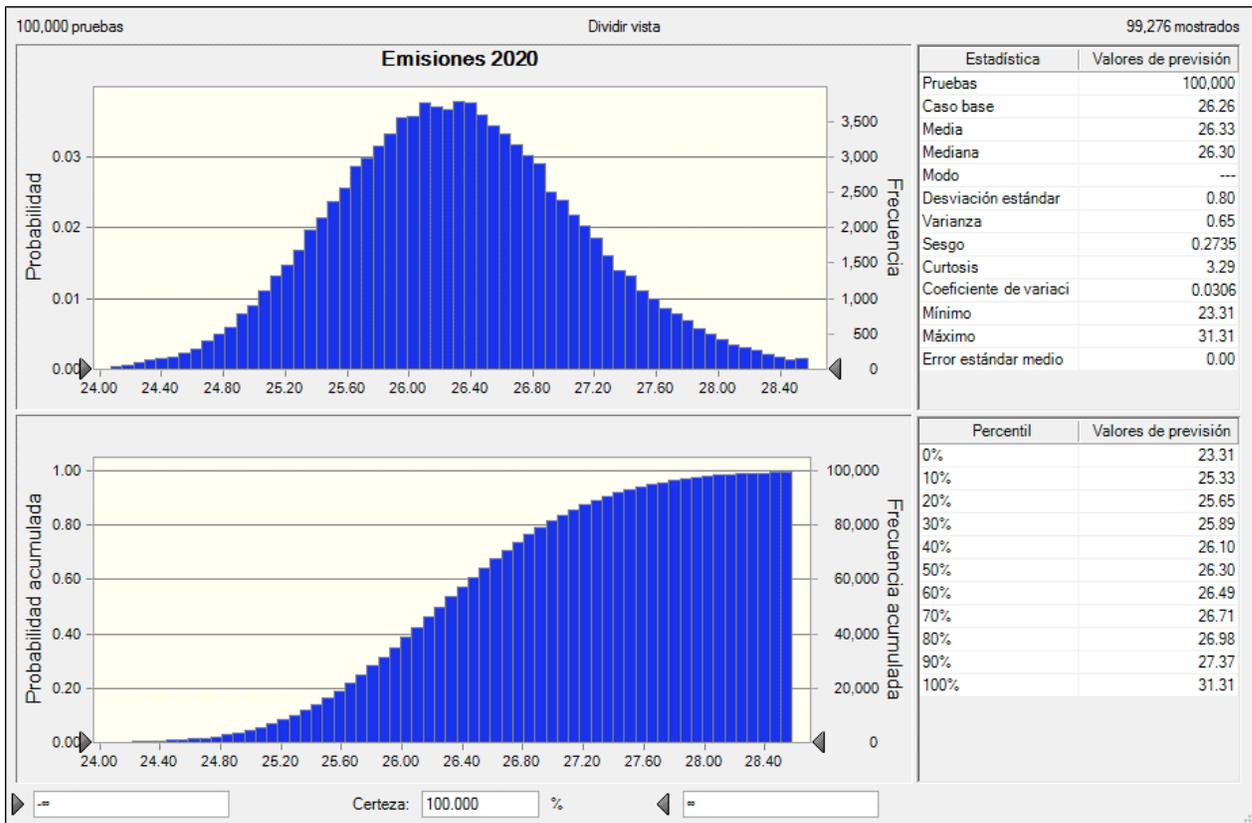
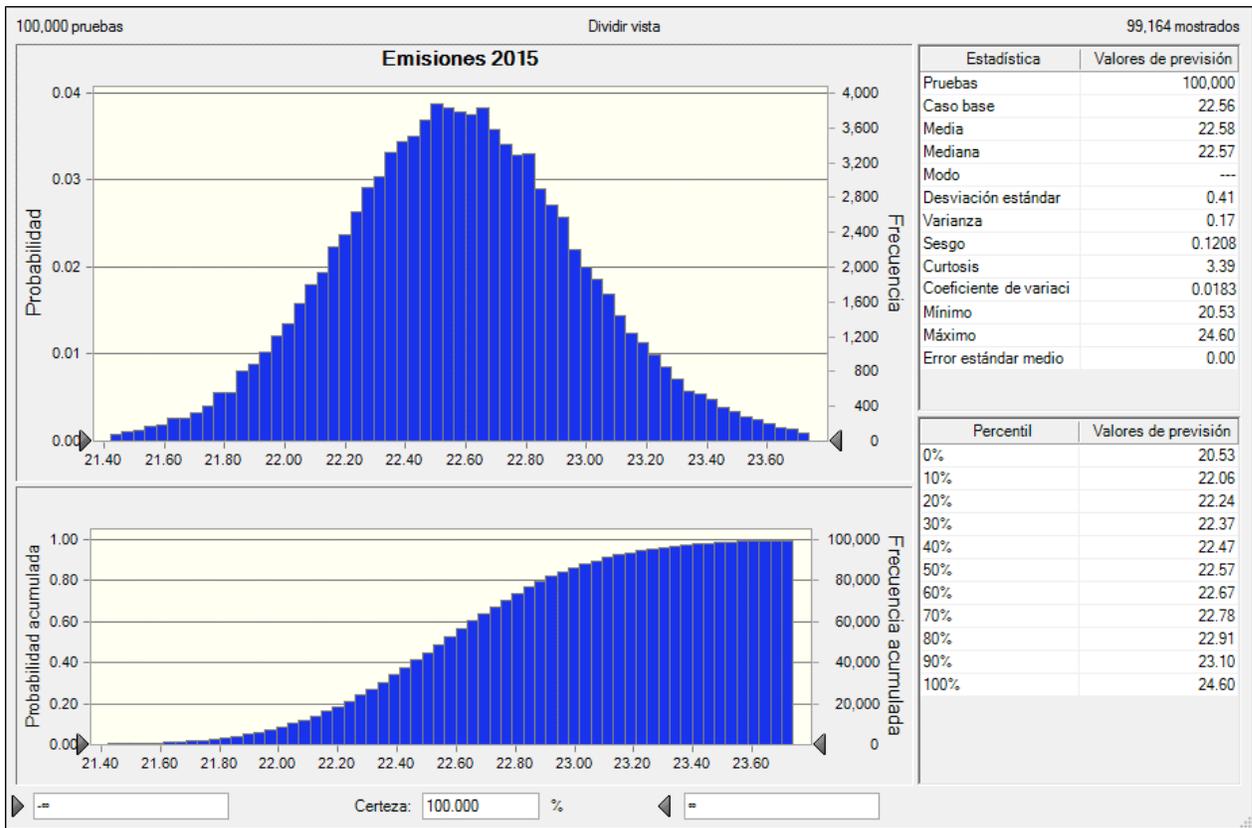
11.5 ANEXO E: Capacidad máxima anual de producción de cobre y vectores de probabilidad para cada clasificación de la producción esperada

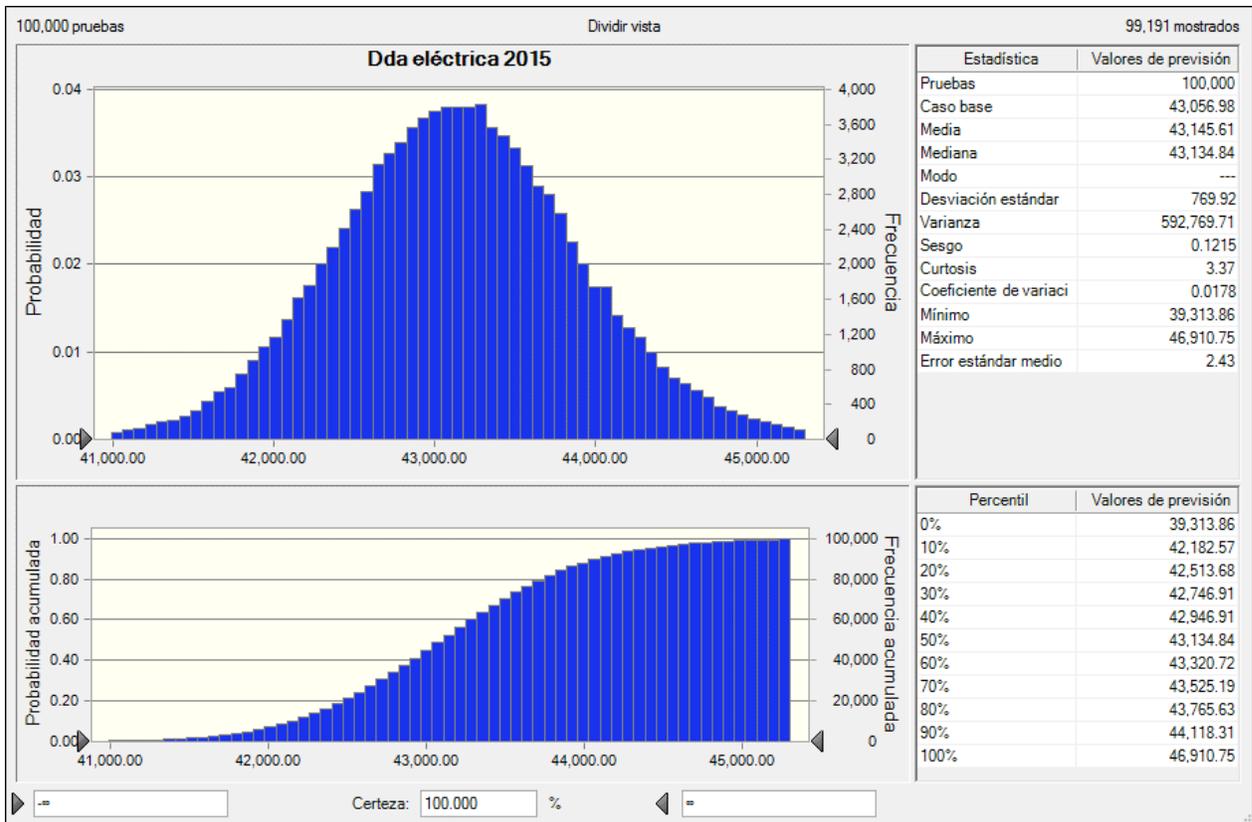
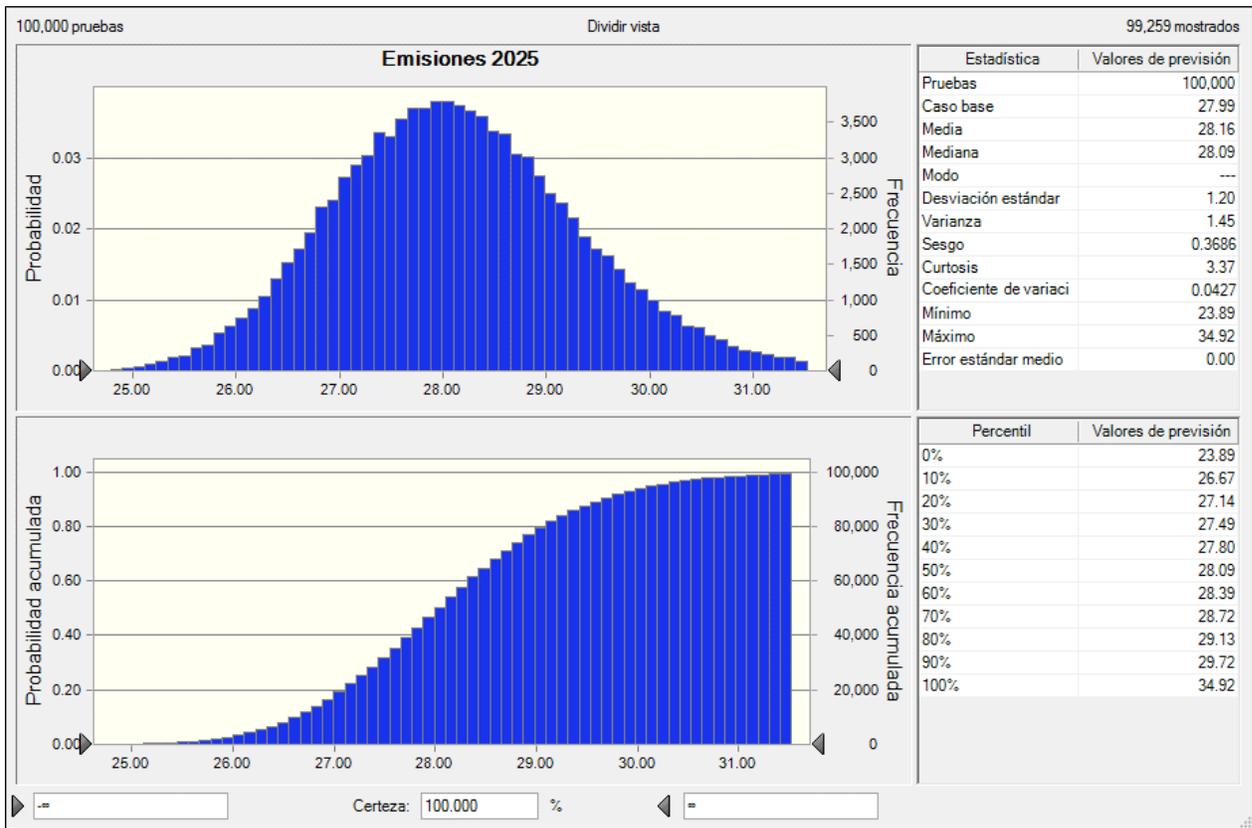
Vectores de probabilidad para cada clasificación

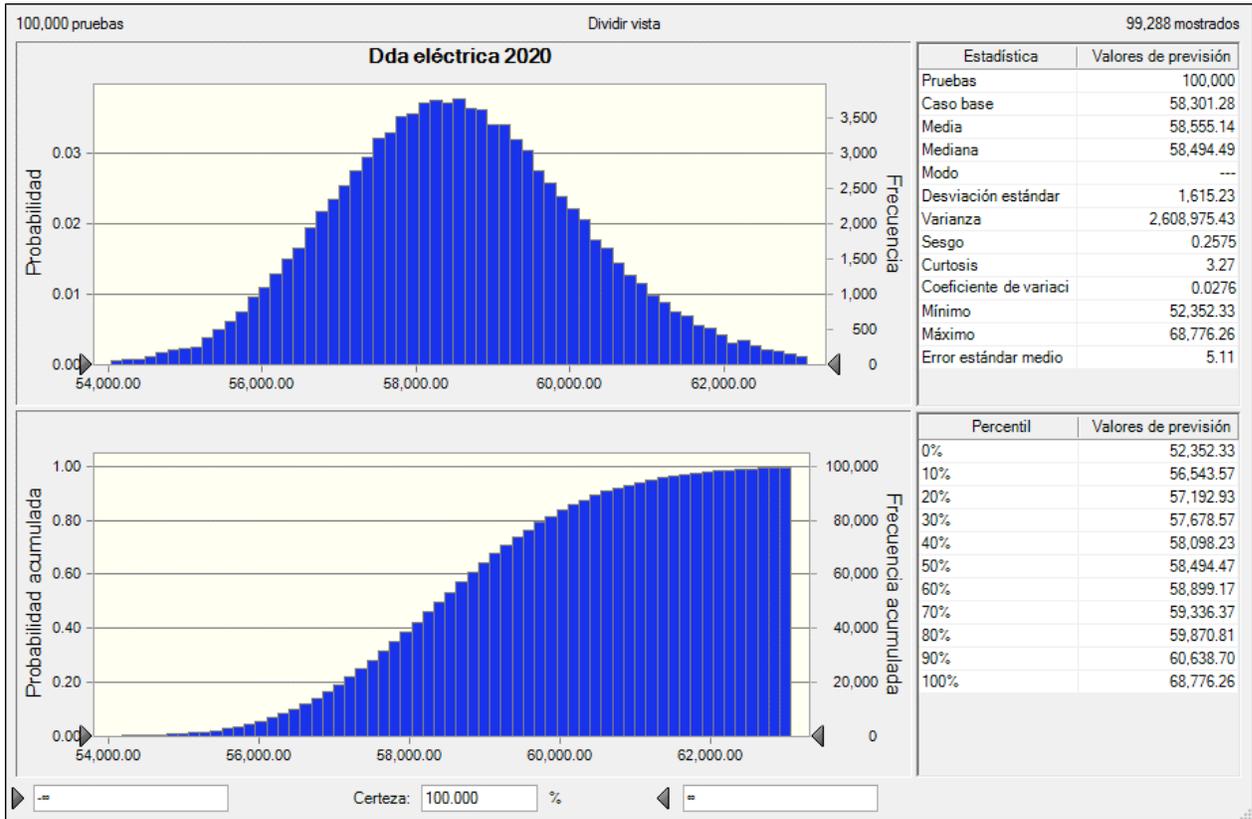
<b>Año</b>	<b>Capacidad máxima</b>	<b>Operación base</b>	<b>Ejecución base</b>	<b>Factibilidad probable</b>	<b>Factibilidad posible</b>	<b>Prefactibilidad posible</b>	<b>Factibilidad potencial</b>	<b>Prefactibilidad potencial</b>
<b>2013</b>	5776	0.95	0.72	0.46	0.4	0.1	0.25	0.10
<b>2014</b>	6318	0.95	0.76	0.59	0.52	0.2	0.38	0.21
<b>2015</b>	6503	1	0.81	0.77	0.67	0.3	0.53	0.33
<b>2016</b>	6462	1	0.86	0.82	0.71	0.48	0.60	0.44
<b>2017</b>	7060	1	0.91	0.82	0.71	0.48	0.65	0.52
<b>2018</b>	7429	1	0.95	0.82	0.71	0.48	0.55	0.55
<b>2019</b>	7938	1	0.95	0.82	0.71	0.48	0.68	0.62
<b>2020</b>	8441	1	0.95	0.82	0.71	0.48	0.69	0.63
<b>2021</b>	8437	1	0.95	0.82	0.71	0.48	0.69	0.66
<b>2022</b>	8570	1	0.95	0.82	0.71	0.48	0.70	0.69
<b>2023</b>	8442	1	0.95	0.82	0.71	0.48	0.70	0.68
<b>2024</b>	8234	1	0.95	0.82	0.71	0.48	0.70	0.69
<b>2025</b>	8409	1	0.95	0.82	0.71	0.48	0.70	0.69
<b>2026</b>	8398	1	0.95	0.82	0.71	0.48	0.70	0.69
<b>2027</b>	8385	1	0.95	0.82	0.71	0.48	0.70	0.69
<b>2028</b>	8374	1	0.95	0.82	0.71	0.48	0.70	0.69
<b>2029</b>	8362	1	0.95	0.82	0.71	0.48	0.70	0.69
<b>2030</b>	8350	1	0.95	0.82	0.71	0.48	0.70	0.69

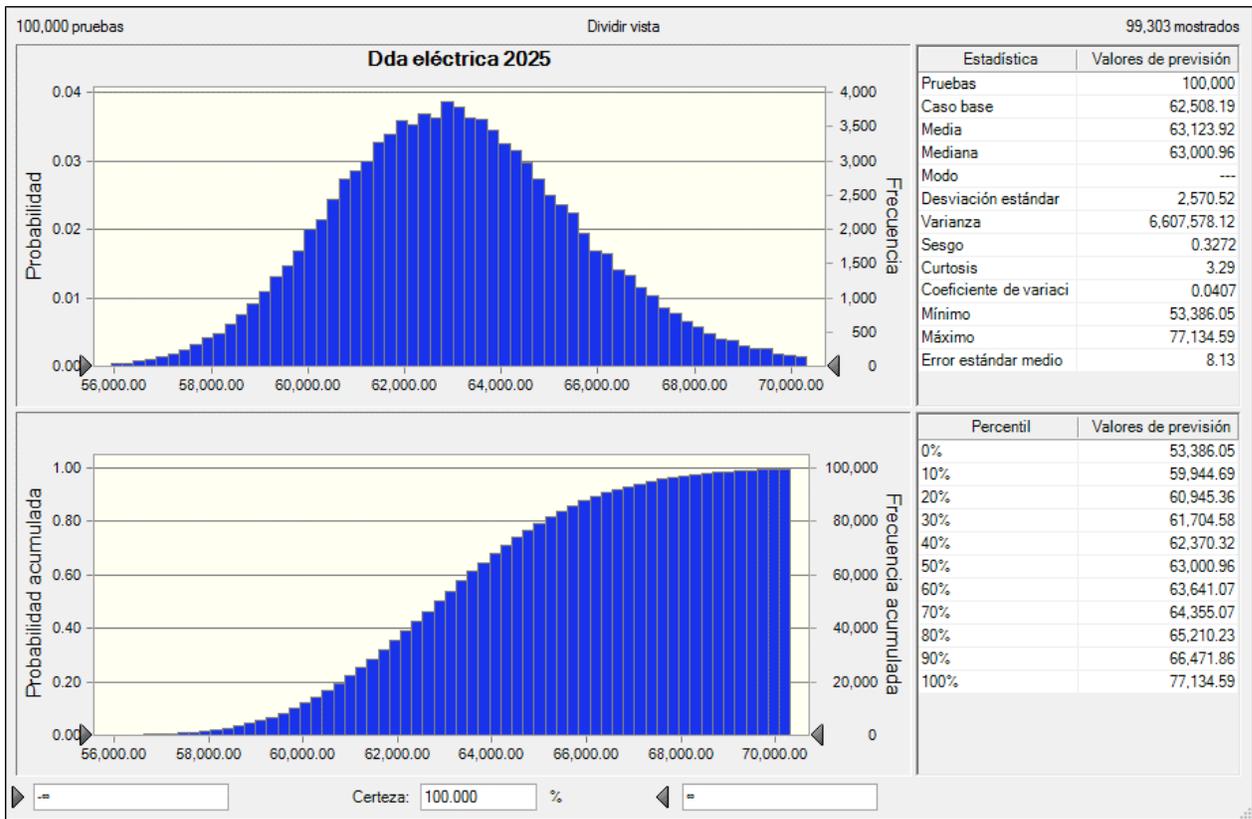
11.6 ANEXO F: Gráficos con los resultados de emisiones y demanda eléctrica para los años 2015, 2020 y 2025, del modelo probabilístico de los sectores de Industria y Minería, y CPR.

Industria y Minería

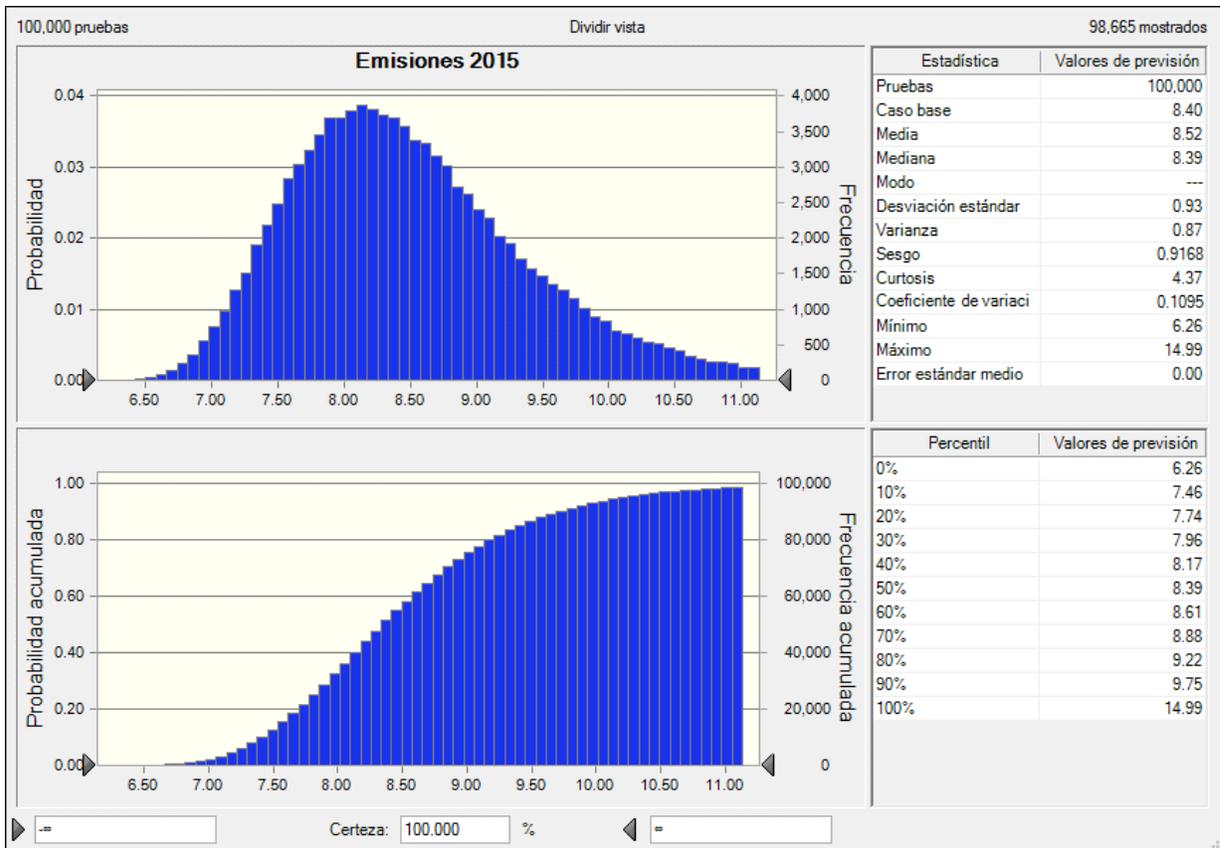


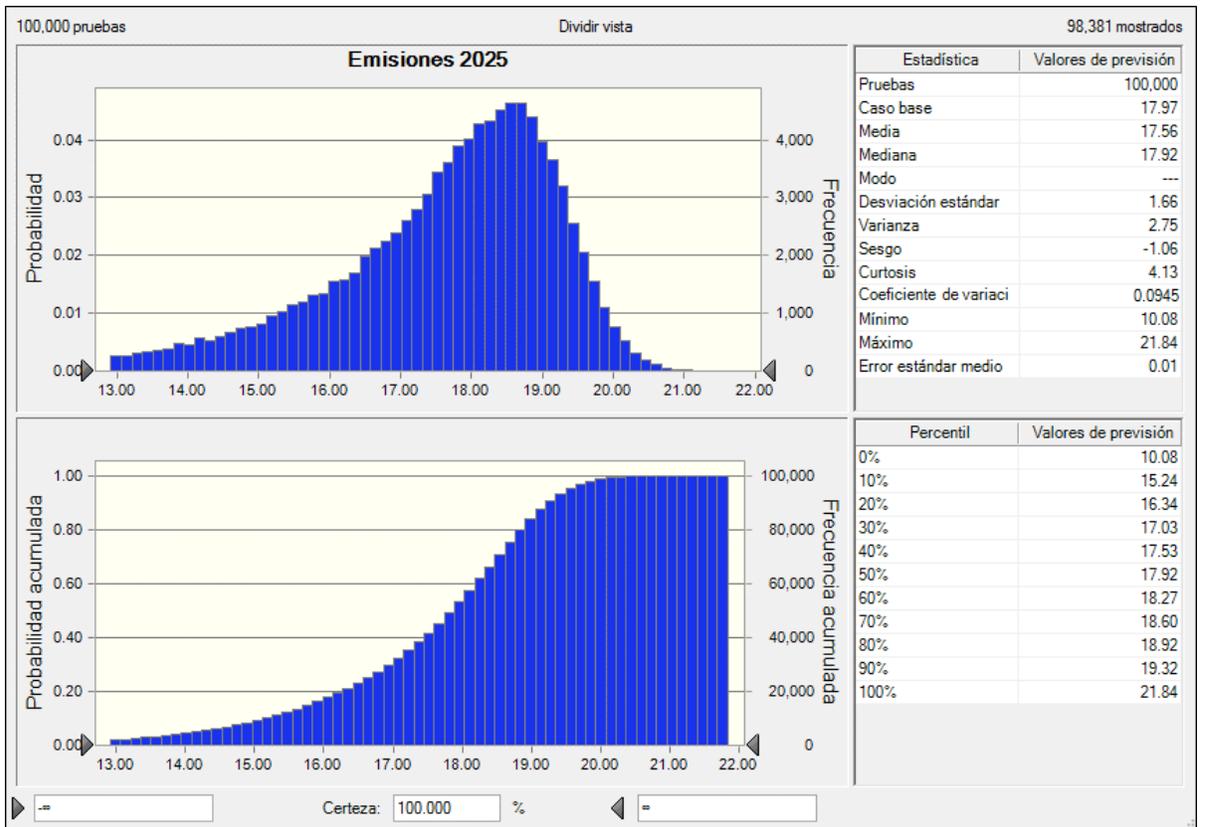
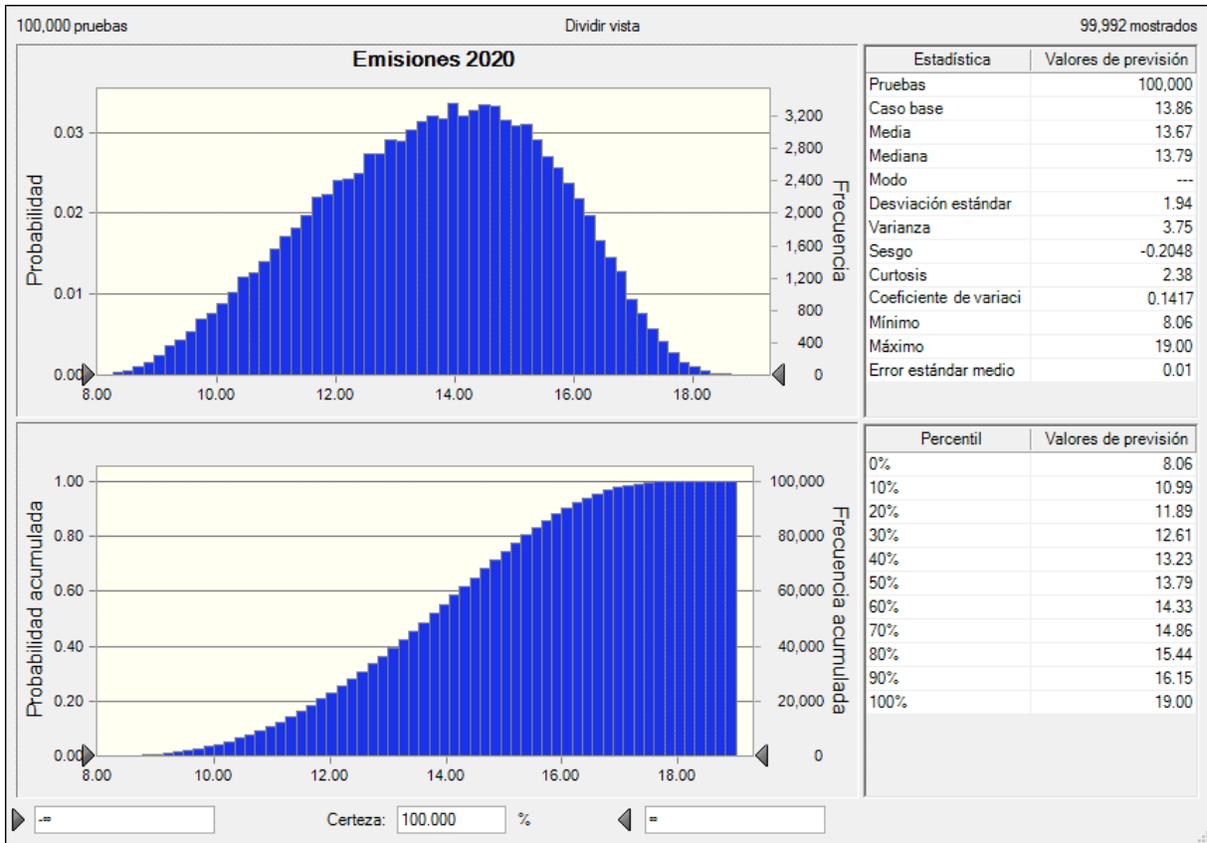


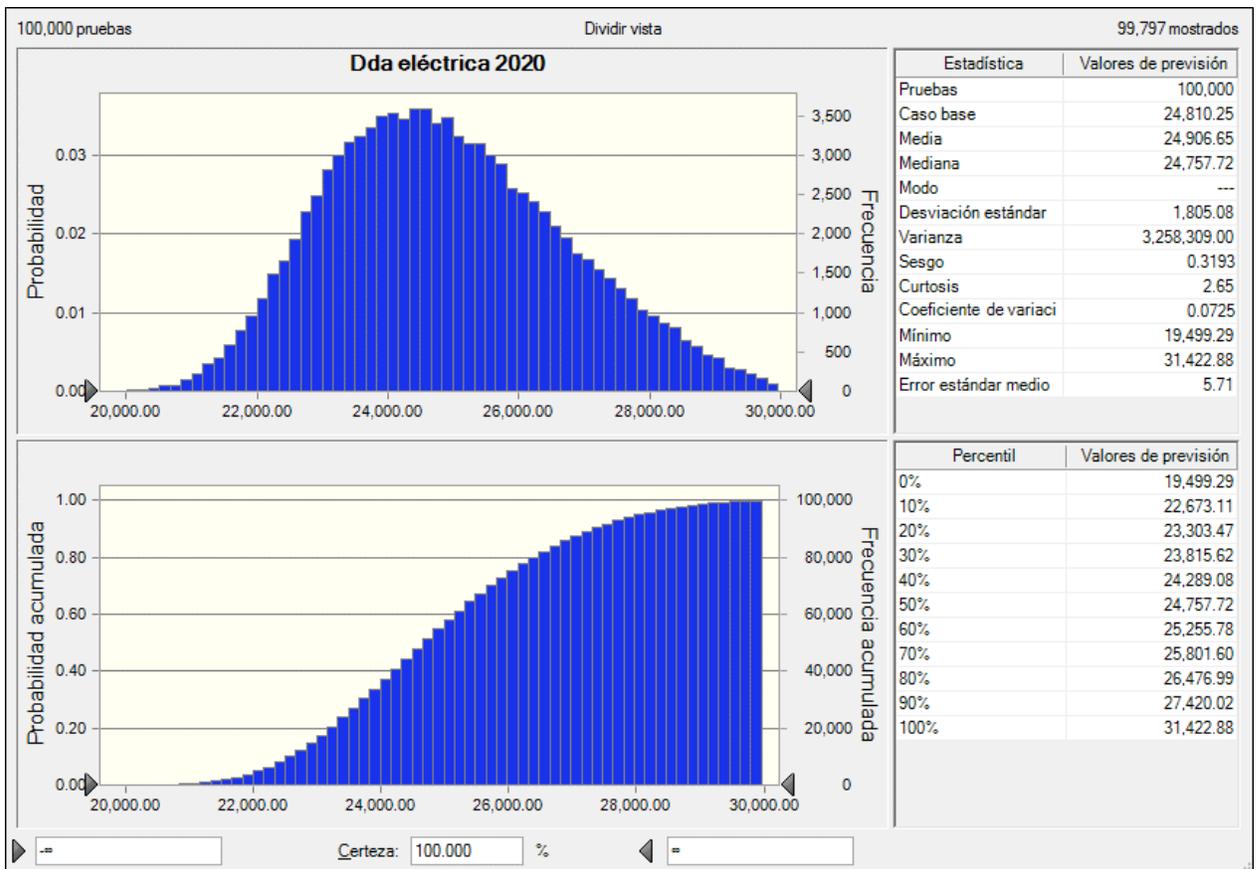
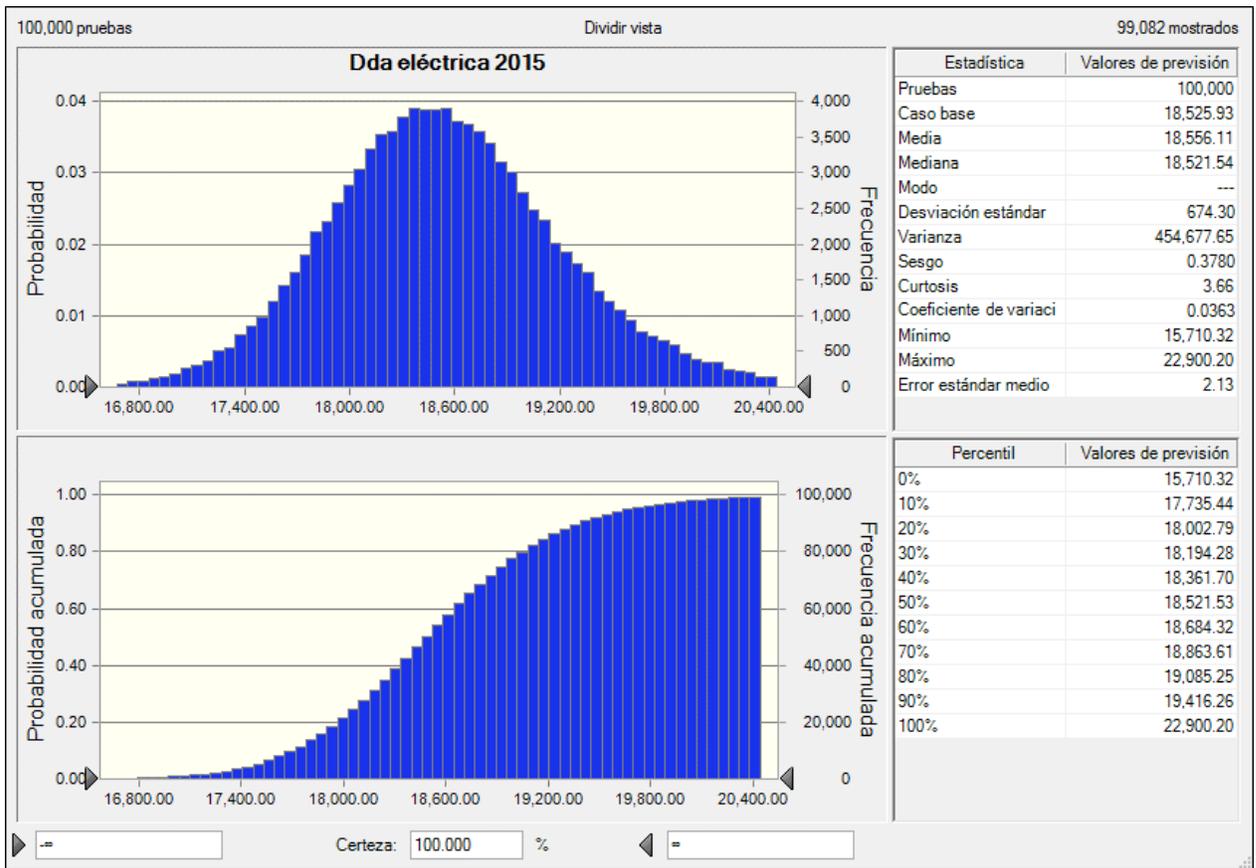


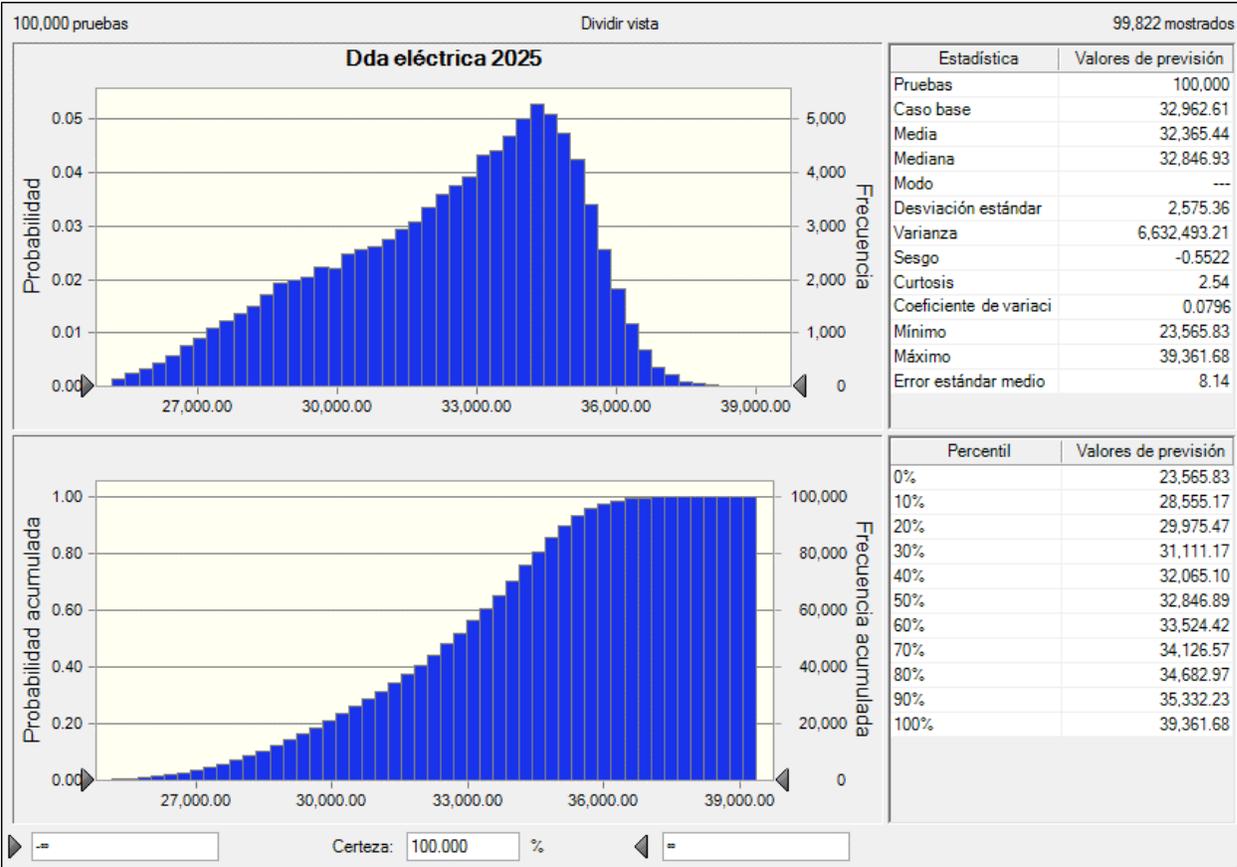


## CPR

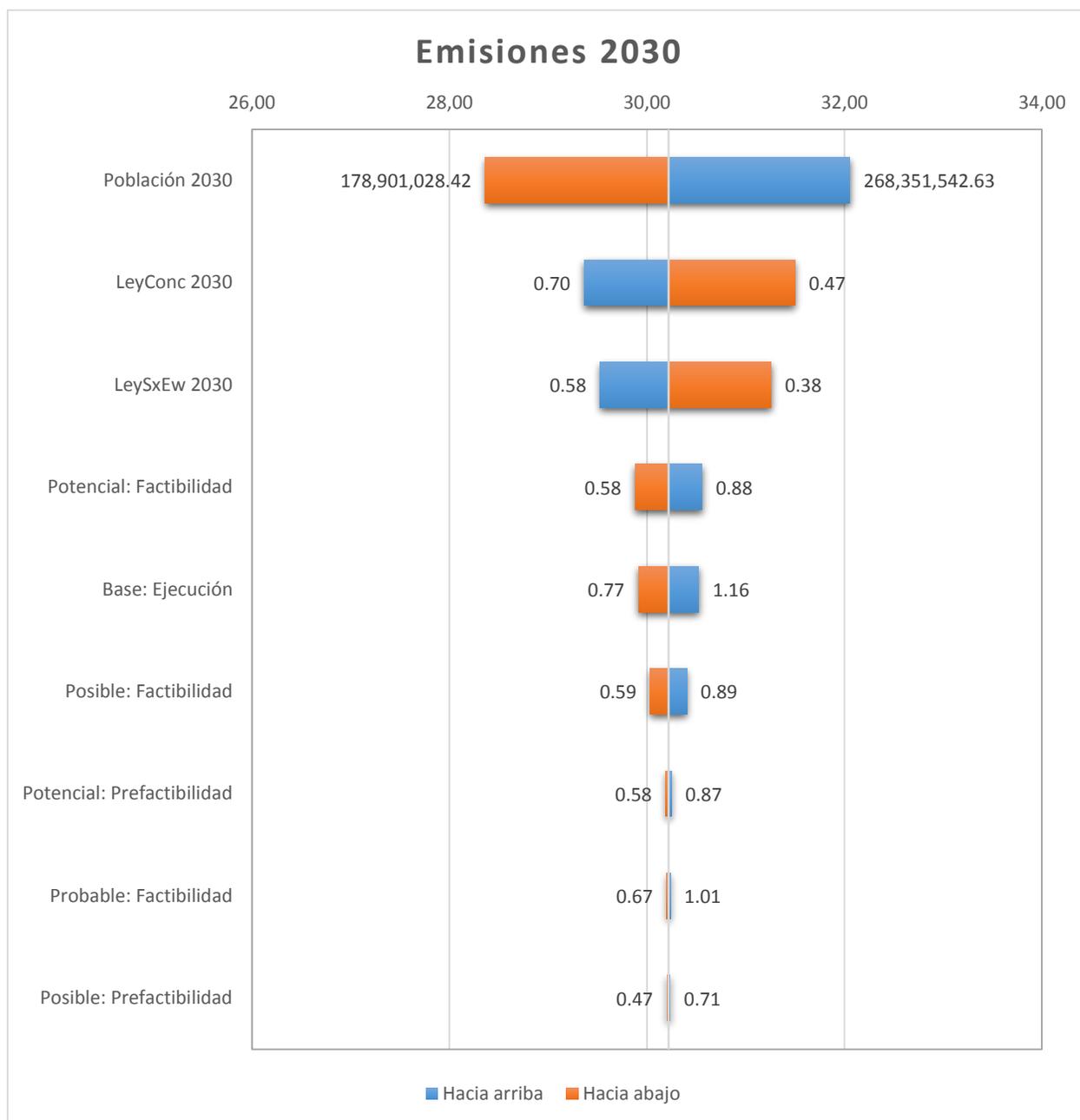








## 11.7 ANEXO G: Gráficos de análisis de importancia



## Dda eléctrica 2030

