

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN)

Julio 2018

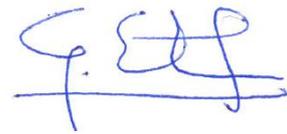
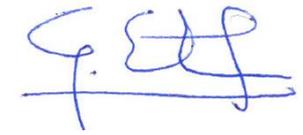
21399 / IIT-003 v. 0B

No se permite la reproducción total o parcial de este documento, ni su incorporación a un sistema informático, ni su transmisión en cualquier forma o por cualquier medio, sea éste electrónico, mecánico, por fotocopia, por grabación u otros métodos, sin el permiso previo y por escrito de. IDOM, CONSULTING, ENGINEERING, ARCHITECTURE, S.A.U.

Copyright © 2018, IDOM CONSULTING, ENGINEERING, ARCHITECTURE, S.A.U



**Estudio para la identificación y evaluación de posibles
 efectos e impactos ambientales producidos por la
 generación de energía nuclear de potencia en Chile.
 Informe N° 2**

Redactado:	Revisado:	Aprobado:
<i>Firma</i>   Belén Martínez	<i>Firma</i> 	<i>Firma</i> 
<i>Nombre</i> Sara del Hoyo (SHG) / Belén Martínez (BMC)	<i>Nombre</i> Gabriel Esteban (GEL)	<i>Nombre</i> Gabriel Esteban (GEL)
<i>Fecha</i> 04/07/2018	<i>Date</i> 06/07/2018	<i>Date</i> 09/07/2018

Área	Encargo	Informe	Versión	CD
NS-MA	21399	IIT-003	0B	07.03

En blanco intencionadamente

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

TABLA DE VERSIONES

<i>Versión</i>	<i>Fecha</i>	<i>Objeto de la versión</i>
0A	Junio 2018	Edición inicial
0B	Julio 2018	Incorporación de comentarios de CCHEN

MODIFICACIONES RESPECTO A LA VERSIÓN ANTERIOR

--

LISTA DE PENDIENTES

<i>No.</i>	<i>Apartado</i>	<i>Descripción</i>

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

En blanco intencionadamente

ÍNDICE DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
2.	OBJETIVOS Y ALCANCE	3
3.	CARACTERIZACIÓN DEL TERRITORIO CHILENO	4
3.1.	Variables sobre el medio físico	7
3.1.1.	Clima.....	7
3.1.2.	Geología y sismología	16
3.1.3.	Suelo.....	19
3.1.4.	Hidrología	22
3.1.5.	Contaminación atmosférica	28
3.2.	Variables sobre el medio biótico.....	32
3.2.1.	Flora y fauna.....	32
3.3.	Variables socioeconómicas	37
3.3.1.	Demografía.....	37
3.3.2.	Sector agropecuario	38
4.	EFFECTOS DE LAS CATEGORÍAS DE IMPACTO DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA SOBRE LAS VARIABLES AMBIENTALES.....	41
4.1.	Etapas de la generación de energía nuclear estudiadas: el ciclo de combustible nuclear y vida de una central nuclear	41
4.2.	Categorías de impacto.....	42
4.2.1.	Efectos sobre los recursos y los ecosistemas.....	45
4.2.2.	Efectos sobre la salud humana	58
4.3.	Efectos particularizados a las tres regiones de estudio	77
4.3.1.	Región de Antofagasta	78
4.3.2.	Región de Coquimbo.....	79
4.3.3.	Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.....	81
5.	IDENTIFICACIÓN DE LAS MEDIDAS TÉCNICAS, ADMINISTRATIVAS Y LEGALES IMPLEMENTADAS O EXIGIDAS A LA INDUSTRIA NUCLEAR PARA PREVENIR O MITIGAR LOS POSIBLES EFECTOS E IMPACTOS SOBRE LAS PERSONAS Y EL MEDIOAMBIENTE	84
5.1.	Medidas para la mitigación en la disminución de los recursos minerales	85
5.2.	Medidas para la mitigación en la ecotoxicidad del medio acuático	88
5.3.	Medidas para la mitigación de los efectos nocivos de la radiación	92
5.3.1.	IAEA.....	92
5.3.2.	Directivas EURATOM.....	102
5.3.3.	Estados Unidos	106
5.3.4.	España.....	108
5.4.	Otras categorías de impacto.....	109

6. CONCLUSIONES.....	111
7. BIBLIOGRAFÍA.....	115

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Consumos eléctricos por regiones (2015)	6
Tabla 2. Regiones propuestas para la descripción de las variables ambientales	7
Tabla 3. Estaciones de medida de monitoreo de contaminantes atmosféricos de la región de Antofagasta.....	30
Tabla 4. Estaciones de medida de contaminantes atmosféricos de la región de Coquimbo	31
Tabla 5. Estaciones de medida de PM10 en la región del Libertador Bernardo O'Higgins.....	31
Tabla 6. Poblaciones publicadas por el INE para el año 2017	37
Tabla 7. Características del sector agropecuario en Chile, Censo 2007 [19].....	38
Tabla 8. Distribución de cultivos en las regiones de estudio, Censo 2007.....	39
Tabla 9. Categorización por colores del grado de impacto.....	43
Tabla 10. Categorías de impacto en orden de contribución del ACV de la generación de energía nuclear de potencia clasificadas por categoría de daño	44
Tabla 11. Evaluación del impacto sobre el medio como consecuencia de generación de energía con origen nuclear	46
Tabla 12. Evaluación del impacto sobre el medio como consecuencia de generación de energía con origen nuclear	48
Tabla 13. Evaluación del impacto sobre el medio como consecuencia de generación de energía con origen nuclear	49
Tabla 14. Evaluación del impacto sobre el medio como consecuencia de generación de energía con origen nuclear	51
Tabla 15. Evaluación del impacto sobre el medio como consecuencia de generación de energía con origen nuclear	52
Tabla 16. Evaluación del impacto sobre el medio como consecuencia de generación de energía con origen nuclear	54
Tabla 17. Evaluación del impacto sobre el medio como consecuencia de generación de energía con origen nuclear	56
Tabla 18. Evaluación del impacto sobre el medio como consecuencia de generación de energía con origen nuclear	58
Tabla 19. Evaluación del impacto sobre el medio como consecuencia de generación de energía con origen nuclear	66
Tabla 20. Evaluación del impacto sobre el medio como consecuencia de generación de energía con origen nuclear	68
Tabla 21. Evaluación del impacto sobre el medio como consecuencia de generación de energía con origen nuclear	70

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

Tabla 22. Evaluación del impacto sobre el medio como consecuencia de generación de energía con origen nuclear	72
Tabla 23. Evaluación del impacto sobre el medio como consecuencia de generación de energía con origen nuclear	74
Tabla 24. Evaluación del impacto sobre el medio como consecuencia de generación de energía con origen nuclear	76
Tabla 25. Evaluación del impacto sobre el medio como consecuencia de generación de energía con origen nuclear	77
Tabla 26. Reservas mundiales de torio [52].....	87
Tabla 27. Límites en el incremento de temperatura del canal de descarga (EEUU).....	91
Tabla 28. Relación de las Directivas EURATOM de aplicación directa en la mitigación del impacto radiológico sobre el medioambiente y las personas	103
Tabla 29. Efectos de las categorías de impacto sobre las variables ambientales estudiadas.	111

LISTA DE FIGURAS

Figura 3-1. Regiones propuestas para la descripción de las variables ambientales	6
Figura 3-2. Tipologías de clima por regiones en la macrozona Norte.	8
Figura 3-3. Tipologías de clima por regiones en la macrozona Centro	10
Figura 3-4. Tipologías de clima por regiones en la macrozona Sur y Austral	12
Figura 3-5. Estación del Cerro Moreno, Antofagasta. Temperatura media diaria (2017) [4].....	13
Figura 3-6. Estación de El Loa, Antofagasta. Temperatura media diaria (2017) [4].....	13
Figura 3-7. Estación de El Cerro Moreno, Antofagasta. Precipitación caída y normal (2017) [4]	14
Figura 3-8. Estación de El Loa, Antofagasta. Precipitación caída y normal (2017) [4].....	14
Figura 3-9. Estación de la Serena, Coquimbo. Temperatura media diaria (2017) [4]	15
Figura 3-10. Estación de La Serena, Coquimbo. Precipitación caída y normal (2017) [4].....	15
Figura 3-11. Estación de General Freire, Curicó. Temperatura media diaria (2017) [4]	16
Figura 3-12. Estación de General Freire, Curicó. Precipitación caída y normal (2017) [4]	16
Figura 3-13. Nivel de altura por macrozonas [3].....	17
Figura 3-14. Marco tectónico de Chile: los colores indican la profundidad de la Placa de Nazca	18
Figura 3-15. Efecto de la desertificación y la erosividad sobre el territorio [10] y [11].....	20
Figura 3-16. Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes (SPPC) [7]	22
Figura 3-17. Glaciar Pío XI, en la región de Magallanes en la macrozona Austral	23
Figura 3-18. Río Baker, región Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo	24
Figura 3-19. Contribución de las fuentes a la generación nacional de contaminantes (2017) [7]	29

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

Figura 3-20. Zonas Saturadas por la contaminación atmosférica [85]	29
Figura 3-21. Zonas destacadas en biodiversidad	33
Figura 3-22. Zonas de captura de carbono por niveles de toneladas por hectárea	33
Figura 3-23. Estado de los ecosistemas terrestres, 2015 [16].....	34
Figura 3-24. Estado de los ecosistemas terrestres por región, 2015 [16]	35
Figura 3-25. Porcentaje de especies clasificadas, 2015 [16].....	36
Figura 4-1. Años previstos para cada mineral asumiendo un consumo constante desde 2008 [21]	45
Figura 4-2. Evolución de la dosis debida a efluentes líquidos y efluentes gaseosos en la Central Nuclear de Almaraz en los municipios más significativos. Comparativa con los límites de dosis administrativos y legales y con los niveles de radiación natural en las inmediaciones del emplazamiento.....	62
Figura 4-3. Comparativa de dosis de radiación debida a causas artificiales o antropogénicas [33] [34] [35].	64
Figura 4-4. Concentración de ozono por años y nivel fijado por la norma	72
Figura 4-5. Estado del agujero de la capa de ozono del Antártico [43]	75
Figura 4-6. Estado de la erosión de la región de Antofagasta [45].....	78
Figura 4-7. Áreas de restricción y zonas de prohibición de aguas subterráneas de la región de Antofagasta [46].....	79
Figura 4-8. Estado de la erosión de la región de Coquimbo [45].....	80
Figura 4-9. Áreas de restricción y zonas de prohibición de aguas subterráneas de la región de Coquimbo [46].....	81
Figura 4-10. Estado de la erosión de la región del Libertador General Bernardo O'Higgins [45]	82
Figura 4-11. Áreas de restricción y zonas de prohibición de aguas subterráneas de la región del Libertador General Bernardo O'Higgins [46]	83
Figura 5-1. Lightbridge fuel.	86
Figura 5-2 . Esquema de las recomendaciones emitidas por la IAEA.....	93

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS Y SIGLAS

ALARA	<i>As Low As Reasonably Achievable</i>
ACV	Análisis Ciclo de Vida
BAT	<i>Best Available Techniques</i>
CCHEN	Comisión Chilena de Energía Nuclear
COP	Contaminantes Orgánicos Persistentes
COV	Compuestos Orgánicos Volátiles
COVNM	Compuestos Orgánicos Volátiles No Metánicos

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

CSN	Consejo de Seguridad Nuclear
DGA	Dirección General de Aguas
FAO	<i>Food and Agriculture Organization</i>
GEI	Gases de Efecto Invernadero
IAEA	<i>International Atomic Energy Agency</i>
ICRP	<i>International Commission on Radiological Protection</i>
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
PNP	Plan Nuclear de Potencia
PWR	<i>Pressurizer Water Reactor</i>
SPPC	Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes
UV	Ultra Violeta

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

En blanco intencionadamente

1. INTRODUCCIÓN

Desde su creación en 1965, la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN) tiene como misión investigar, desarrollar y controlar las aplicaciones pacíficas de la energía nuclear, generando valor y bien público, y asegurando la protección del medioambiente y la seguridad de las personas. Entre todas las posibles aplicaciones, destaca la de generación de energía eléctrica; la posibilidad de una Plan Nuclear de Potencia (PNP) lleva varios años en discusión y evaluación en Chile.

Así pues, la CCHEN, en su calidad de organismo asesor del estado en materias relacionadas con los usos pacíficos de la energía nuclear, ha recibido el mandato de liderar el desarrollo de los estudios requeridos para que, durante el próximo proceso de evaluación de la Política Energética Nacional, la energía nuclear pueda ser considerada dentro de las opciones a evaluar para la matriz energética nacional.

Dentro de los temas relevantes a ser considerados, se encuentra el poder determinar y evaluar qué impactos ambientales están asociados a la generación de la energía nuclear de potencia y como esta se compara respecto a otras tecnologías de generación eléctrica.

Es necesario el empleo de enfoques multidisciplinarios de diversas áreas de conocimiento para poder llegar a comprender, medir, cuantificar los impactos ambientales que se generan por las actividades humanas y posteriormente traducirlos con la mayor precisión posible a un lenguaje común que permita entender y comparar las distintas variables que se presentan.

Para poder determinar el impacto medioambiental sobre el entorno de una actividad industrial, concretamente, de una central nuclear de potencia es necesario llevar a cabo un análisis de distintas variables ambientales que conforman el territorio. El llevar a cabo un estudio del estado ambiental del territorio permite posteriormente incluir estos conceptos a la hora de destacar zonas como las más apropiadas para desarrollar la actividad de la manera más eficiente y medioambientalmente respetuosa posible. Una vez estudiada la situación ambiental en la que se encuentra el territorio chileno respecto a las variables ambientales seleccionadas, es preciso hacer una descripción de cuál es la influencia sobre dichas variables estudiadas y si se producen grandes interferencias o no por el desarrollo de la actividad industrial en cuestión.

A lo largo de los años, como consecuencia del análisis de los impactos al medio y las personas se han ido recopilando medidas y buenas prácticas con el fin de mitigar los efectos del desarrollo de estas tecnologías.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

Para abordar este proceso, la CCHEN ha contratado a IDOM, mediante la licitación referencia ID: 872-204-LE17 "Identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia", un servicio de asesoría para la identificación y evaluación que tendría la incorporación de la generación nucleoelectrica en el país.

Este documento surge como el tercer entregable (Informe 2) de los cuatro a ser desarrollados y entregados a satisfacción de la CCHEN a lo largo del proyecto.

2. OBJETIVOS Y ALCANCE

En este estudio se plantean tres objetivos generales:

- 1) Descripción general del territorio chileno atendiendo a distintas variables ambientales.
- 2) Estudio de los posibles impactos de la instalación y el funcionamiento de una central nuclear sobre las personas y el medioambiente según las variables ambientales del primer objetivo.
- 3) Análisis y consulta de las referencias internacionales para la mitigación de los efectos adversos de las centrales nucleares sobre las personas y el medioambiente.

En cuanto al primer objetivo, dada la diversidad que presenta el país, en la caracterización del territorio se presentan tres regiones como una primera aproximación de posibles emplazamientos para la instalación de las centrales nucleares de potencia. Con esta selección de zonas, se describen las variables ambientales de forma más particularizada.

Con el fin de ilustrar el segundo objetivo, se presentará una escala cualitativa que pretende mostrar la contribución de cada categoría de impacto en los resultados visibilizados por el ACV. Para ello, se normalizarán las categorías de impacto con respecto a aquella que suponga una mayor contribución. De este modo, se podrá analizar cualitativamente el grado de impacto de cada categoría.

Por último, en el tercer objetivo se presentarán las medidas adoptadas por la industria nuclear en materia de mitigación de impactos sobre el medioambiente y las personas. Para ello, se analizarán las categorías de impacto más significativas que resultan del análisis del segundo objetivo. En base a esto, se recopilará la normativa vigente de las principales referencias internacionales que tiene como objetivo hacer frente a dichas categorías de impacto.

3. CARACTERIZACIÓN DEL TERRITORIO CHILENO

Para determinar el impacto medioambiental sobre el entorno o las personas derivado de una actividad industrial previamente es conveniente conocer y caracterizar el medio al que afectará dicha actividad. En particular, para una central de generación eléctrica es necesario tener un conocimiento detallado de cuáles son las condiciones medioambientales iniciales antes de la explotación. Es por esto por lo que se describen en este apartado las diferentes variables ambientales del medio susceptibles de verse afectadas por la construcción de la planta.

Dado que el caso de estudio no se restringe a un emplazamiento concreto dentro del territorio chileno, se desarrolla un análisis general de las variables ambientales. Sin embargo, las características del territorio hacen de él un país enormemente rico en biodiversidad, clima, demografía y demás variables por lo que la descripción de ellas puede diversificarse enormemente. De cara a simplificar esta descripción ambiental, se puede realizar una aproximación de zonas en las cuales las probabilidades de la instalación de centrales nucleares de potencia pudieran ser más altas atendiendo a diferentes parámetros demográficos, ambientales y estratégicos.

Tratando de cubrir los temas más críticos a la hora de tomar la decisión del emplazamiento de una nueva industria una primera aproximación de estos parámetros puede ser la siguiente [1]:

- Zonas de baja densidad poblacional
- Lejos de las zonas densamente pobladas
- Cerca de abundantes recursos de agua para refrigeración
- Cerca de puertos y caminos que faciliten la construcción y operación
- Cerca de líneas de transmisión de energía eléctrica
- En áreas de menor sismicidad y alejadas de volcanes
- En áreas de meteorología adecuada
- Lejos de zonas de elevada contaminación ambiental
- Lejos de centros críticos que puedan verse inmovilizados por accidentes nucleares
- Cerca de los centros de mayor demanda energética

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

- Fuera de áreas protegidas, humedales, parques forestales y similares
- Fuera de áreas de interés patrimonial, histórico, arqueológico y similares
- Con afinidad a la población y economías locales.

El orden de prioridad de estos parámetros a la hora de tomar la decisión puede variar en función de la tecnología implantada y las implicaciones de esta con el entorno e incluso, en el caso de otras tecnologías diferentes a la generación de potencia nuclear, verse otros parámetros involucrados.

En el caso de estudio de la implantación de la tecnología de generación de energía nuclear de potencia, atendiendo a los parámetros detallados anteriormente se puede llegar a la conclusión de que las zonas probables para los emplazamientos de esta tecnología pueden encontrarse de la zona Centro hacia la zona Norte. En estas regiones, existen zonas lejanas a núcleos urbanos de población, pero lo suficientemente cerca de las zonas de mayor demanda energética, aunque este último parámetro no supone un gran peso en la toma de la decisión gracias al Sistema Interconectado Central que abastece al territorio. La demanda hídrica que requiere este tipo de tecnología puede verse cubierta a lo largo de todo el país dada la geografía que provoca que todas las regiones limiten al oeste con el Océano Pacífico ofreciendo los recursos hídricos necesarios. Respecto a la demanda energética, aun existiendo el Sistema Interconectado Central, cabe esperar situar industrias de producción energética en zonas cercanas a los núcleos de mayor demanda energética. Si bien no considerando este parámetro como prioritario a la hora de finalmente decidir un emplazamiento u otro. Con la intención de realizar un ajuste lo más preciso posible a la situación actual y futura, se identifican las zonas de mayor demanda energética. De acuerdo con los datos publicados por Energía Abierta [2] (Iniciativa de la Comisión Nacional de Energía), a fecha de 2015 el consumo eléctrico en la macrozona Centro es el mayor consumidor principalmente por la región Metropolitana y después, le sigue la macrozona Norte.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

Tabla 1. Consumos eléctricos por regiones (2015)

Macrozona	Regiones	Consumo eléctrico (kWh)	Suma consumo (kWh)
Norte	Región de Arica y Parinacota	73.669.068	1.640.596.707
Norte	Región de Tarapacá	119.345.986	
Norte	Región de Antofagasta	227.874.314	
Norte	Región de Atacama	173.648.158	
Norte	Región de Coquimbo	292.758.655	
Norte	Región de Valparaíso	753.300.526	
Centro	Región Metropolitana de Santiago	3.318.435.057	4.351.312.939
Centro	Región del Libertador Gral. Bernardo O'Higgins	420.087.945	
Centro	Región del Maule	449.487.146	
Centro	Región de Ñuble	163.302.791	
Sur	Región del Bío Bío	527.749.437	1.391.289.879
Sur	Región de La Araucanía	284.456.062	
Sur	Región de Los Ríos	153.241.120	
Sur	Región de Los Lagos	425.843.260	
Austral	Región Aisén del Gral. Carlos Ibáñez del Campo	37.436.843	108.589.998
Austral	Región de Magallanes y de la Antártica Chilena	71.153.155	

Como se aproximaba anteriormente, tras el análisis de todos estos parámetros se puede concluir que una aproximación lógica de emplazamientos puede ser las macrozonas Centro y Norte.

Considerando todos estos parámetros, se representan en la Figura 3-1 tres regiones que van a permitir hacer una caracterización más particularizada del territorio chileno.

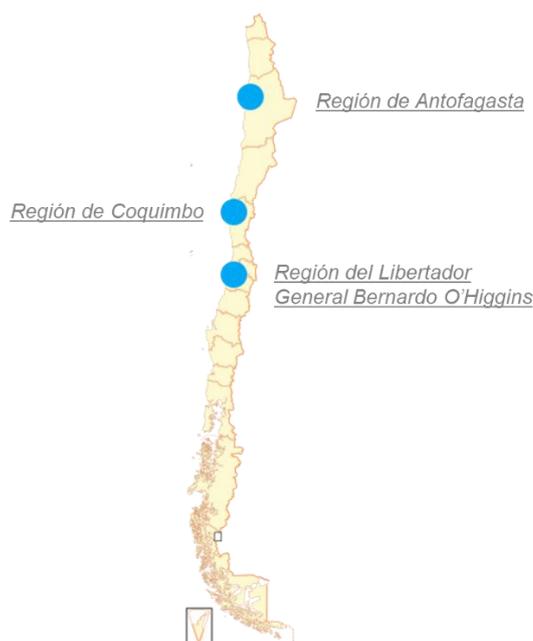


Figura 3-1. Regiones propuestas para la descripción de las variables ambientales

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

Las regiones propuestas para desarrollar la descripción de las variables ambientales por la posible instalación de centrales nucleares de potencia se recogen en la Tabla 2.

Tabla 2. Regiones propuestas para la descripción de las variables ambientales

	Macrozona	Región
1	Norte	Región de Antofagasta
2	Norte	Región de Coquimbo
3	Centro	Región del Libertador General Bernardo O'Higgins

3.1. Variables sobre el medio físico

3.1.1. Clima

a. Zona norte

Dentro de la zona norte se distinguen diferentes clasificaciones climáticas:

- En primer lugar, el **clima desértico con nublados abundantes** que se extiende desde Arica hasta los 29° Sur por la zona costera y se caracteriza por la formación de nubosidad baja. La temperatura ambiente oscila entre 13°C y 22° C con una amplitud térmica diaria de 5 a 7 ° C. Las precipitaciones son muy escasas y se presentan en los meses de invierno. Predominan los vientos del suroeste durante todo el año. La humedad relativa presenta un valor medio anual de 77%.
- Por otro lado, el **clima desértico normal** se presenta sobre los 1.000 metros, en las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá y Antofagasta. Está caracterizado por el predominio de una masa de aire muy estable y seca que origina una gran aridez, cielos despejados todo el año, humedad baja y una alta oscilación térmica diaria que puede llegar a unos 25 °C.
- El **clima desértico marginal bajo** se corresponde con la mayor parte de la región de Atacama hasta donde se alcanza la influencia marítima intensa por el oeste. De Copiapó hacia el norte es de una rigurosa sequedad, en cambio de Copiapó al sur, la inexistencia de la cordillera de la costa permite el transporte de humedad hacia los valles, atenuando así las características desérticas de la zona. La diferencia de temperatura en los valles interiores, entre el mes más cálido y el más frío es de 7 a 8 grados.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

- El **clima desértico marginal de altura** se presenta en las zonas próximas a la cordillera, por encima de los 2.000 metros de altura, entre las regiones de Arica-Parinacota y Atacama. Esta región se ve caracterizada por una masa de aire inestable que da origen a precipitaciones durante casi todos los veranos. Sin embargo, no son tan abundantes como para eliminar la característica desértica. Las temperaturas muestran un régimen relativamente frío, con un promedio no superior a 15° C.
- El **clima de estepa de altura** abarca la zona sobre los 3.000 metros, de las regiones de Arica-Parinacota, Tarapacá y Antofagasta. Su altura hace que las temperaturas sean frías, lo que provoca que muchas de las precipitaciones sean de nieve. Sobre los 5.700 metros, las bajas temperaturas hacen que las nieves sean eternas. Las precipitaciones todavía responden al régimen estival, pero disminuyen de norte a sur, no logrando vencer el carácter de desierto. En Inacaliri, superan los 110 milímetros anuales, mientras que en Socompa no alcanzan a los 40 milímetros.

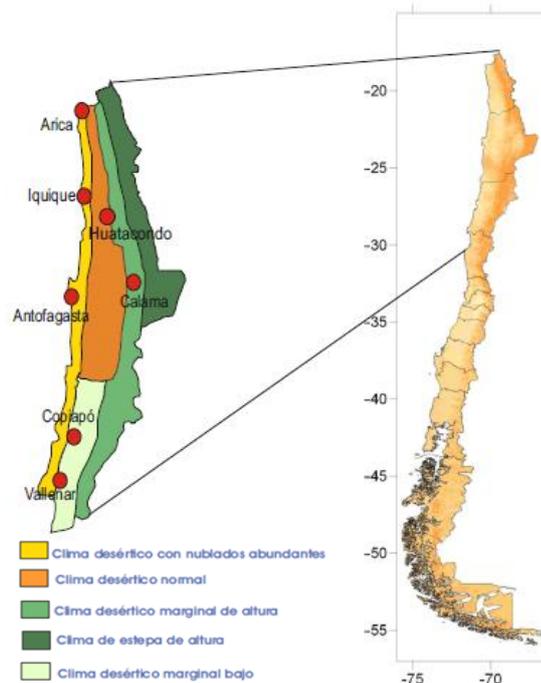


Figura 3-2. Tipologías de clima por regiones en la macrozona Norte.

b. Zona centro

Dentro de esta zona se distinguen los siguientes climas:

- La **estepa con nubosidad abundante** que se presenta bordeando la costa. Se caracteriza por abundante nubosidad baja, localmente intensificada, que se manifiesta con frecuentes nieblas y lloviznas que tienden a disipar al mediodía. Este rasgo se asocia a gran cantidad de días nublados, pocos días despejados y alta humedad relativa. La cercanía del mar produce amplitudes térmicas bajas.
- La **estepa con gran sequedad atmosférica** hacia el interior de la región de Coquimbo, desde donde no se percibe gran influencia oceánica y las precipitaciones invernales son suficientes para eliminar los rasgos desérticos. Se extiende por toda la zona transversal hasta la frontera con Argentina. Su principal característica son los cielos predominantemente despejados, baja humedad relativa, temperaturas elevadas durante el día. Tiene una amplitud térmica diaria del orden de 18° a 20° C. Las precipitaciones son de régimen frontal y se presentan en invierno, donde precipita entre el 75% y el 85% de las cantidades anuales. En los sectores más altos precipita nieve.
- **Clima templado cálido con estación seca prolongada de 8 a 7 meses y gran nubosidad:** La ubicación geográfica de este clima abarca la zona litoral desde los 32°S por el norte hasta la desembocadura del río Mataquito. Las características son similares al clima templado cálido con lluvias invernales y estación seca prolongada de 7 a 8 meses, con la diferencia que la nubosidad es mucho menos persistente y las temperaturas definen mayores amplitudes térmicas anuales. Las precipitaciones se dan en los meses de mayo a agosto, cuando precipita el 80% del total anual, que alcanza un valor climatológico entre 300 y 600 milímetros. La circulación es predominante del suroeste con una intensidad media aproximada de 18 km/hr.
- El clima **templado cálido con estación seca prolongada de 8 a 7 meses:** Las precipitaciones que caen preferentemente en invierno cuando precipita alrededor del 80% de lo que cae en todo el año. Estas precipitaciones son de nieve en aquellas zonas ubicadas sobre 1.500 metros de altura, ocasionalmente con algún nevazón en los sectores bajos. La época seca está constituida por 7 u 8 meses con precipitaciones inferiores a 40 milímetros. La cordillera de la Costa, con algunas cumbres superiores a 2.000 metros impide una mayor influencia marítima. La situación de continentalidad de la región hace que la humedad relativa sea baja, ligeramente superior al 70% como

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

promedio anual. Las amplitudes térmicas anuales son de 13 grados de diferencia. La dirección del viento predominante es del suroeste con una intensidad media de 15 km/hr.

- El clima **templado cálido con estación seca corta de menos de 4 meses** abarca una franja que va por el sector costero desde el Golfo de Arauco hasta aproximadamente la latitud 38° Sur. La Cordillera de Nahuelbuta, cercana al litoral, ejerce un importante efecto diferenciador de las características térmicas, pluviométricas y de viento en ambos lados de ella. En el litoral, las precipitaciones son más abundantes y los vientos más intensos que en las áreas ubicadas junto a la ladera oriental de la cordillera (1.300 milímetros y 1.000 milímetros, respectivamente). En la zona costera la amplitud térmica anual es regular y de bajo valor, en cambio en el interior llega a 9°C.

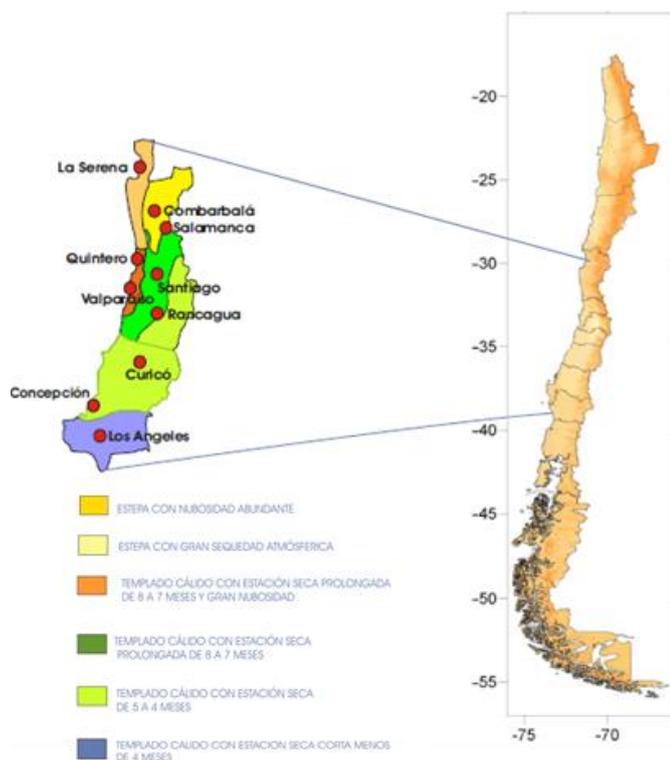


Figura 3-3. Tipologías de clima por regiones en la macrozona Centro

c. Zona sur

Se distinguen las siguientes clasificaciones climáticas:

- **Templado lluvioso con influencia mediterránea:** Cubre la zona comprendida aproximadamente entre la latitud 38° Sur en la región de La Araucanía, hasta la latitud de Castro, en Chiloé, a través de toda la extensión transversal del territorio. La

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

distribución de las precipitaciones es continua durante todo el año (2.000 mm/año). No es posible distinguir una estación seca. La diferencia térmica entre el mes más frío y el más cálido es del orden de 7°C a 12° C, correspondiendo el mayor valor al sector cordillerano, mientras que la amplitud térmica diaria varía entre 8° y 11° C. La temperatura media anual oscila entre 9° y 12° C. La dirección predominante del viento en verano es suroeste con una intensidad de hasta 18 km/hr. En invierno son frecuentes los temporales de viento con vientos del norte (hasta los 110 km/hr).

- **Templado frío de costa occidental con máximo invernal de lluvias:** Corresponde a la zona comprendida entre la latitud 42° Sur y los 53° Sur, es decir toda la región de los canales, excluyendo los Campos de Hielo y los sectores transandinos. Son características de este clima las abundantes precipitaciones que ocurren todo el año. En la región cubierta por este clima no hay accidentes orográficos importantes, por lo tanto, la influencia oceánica ayudada por los intensos vientos se extiende mucho más hacia el interior, impidiendo temperaturas demasiado bajas. Estas continúan disminuyendo de acuerdo con la latitud, definiendo valores promedio de 7 a 11 grados y diferencias entre el mes más frío y el más cálido de 8 grados en el sector norte (Los Lagos y Aysén del General Ibáñez del Campo) y de 4 a 5 grados en la Región austral.
- **Continental trasandino con degeneración estepárica:** Se localiza en una franja de unos 40 kilómetros de ancho que comienza en la latitud 44° Sur y se extiende hacia el sur por el lado oriental del Campo de Hielo Norte hasta el lago O'Higgins, donde es interrumpido por el Campo de Hielo Sur. Reaparece en la latitud 51° Sur, al oriente de la cordillera de Darwin y se prolonga hacia el sur y sureste abarcando la península de Brunswick y la parte sur de Tierra del Fuego. Las precipitaciones disminuyen notablemente en relación con las zonas ubicadas más al oeste.
- **Clima de estepa fría:** Corresponde a la zona fronteriza comprendida desde el norte de Cerro Guido hasta cubrir la mitad norte de Tierra del Fuego. Las precipitaciones disminuyen a medida que la zona se aleja de la cordillera patagónica, generándose montos anuales que varían entre 500 milímetros en el sector norte cercano a la cordillera, hasta unos 250 milímetros en el extremo oriental del estrecho de Magallanes y en la parte norte de Tierra del Fuego. Lo que llueve en los 4 meses más lluviosos es equivalente al 40% del total anual y las precipitaciones invernales son de carácter nival. Entre diciembre y marzo la temperatura media supera los 10°C y en los meses de invierno sólo es del orden de 2°C, lo que define una amplitud térmica anual de 8 a 9 grados.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

- Clima de tundra:** Predomina en el sector ubicado al sur del Estrecho de Magallanes y Tierra del Fuego. Las precipitaciones son abundantes (>1.000 mm/año), aunque en algunos sectores protegidos, como Puerto Williams, no alcanzan a registrar 600 mm/año. En la época de verano son más abundantes que en invierno y en esta última estación son de carácter nival. Las temperaturas medias son del orden de 5°C a 7°C y los vientos son muy homogéneos. Este comportamiento de escasa variabilidad térmica hace que a este clima de tundra se le suela designar también con el término de "isotérmico" (temperatura constante).

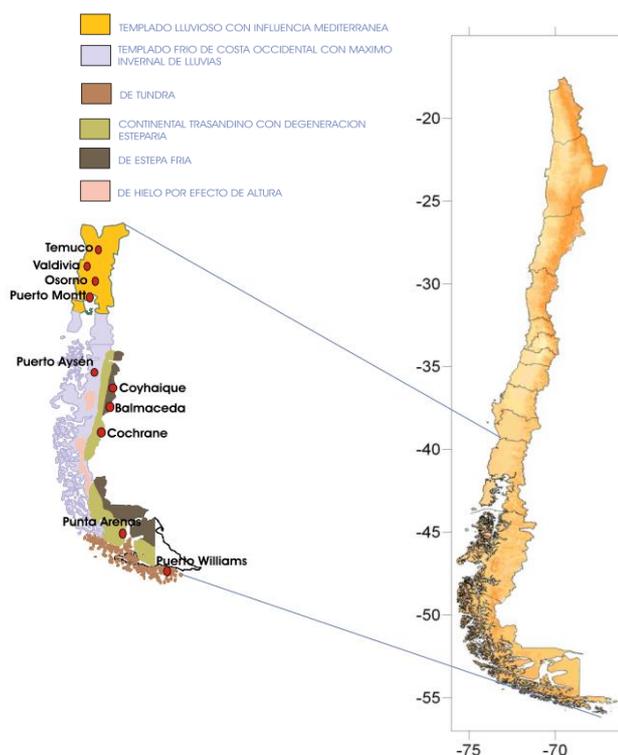


Figura 3-4. Tipologías de clima por regiones en la macrozona Sur y Austral

d. Zona Austral

- Clima frío polar:** Este es el clima del territorio antártico y que está regido principalmente por el centro de alta presión que se localiza sobre el polo. Se dan efectos de lluvia, nieve y aguanieve asociados a vientos que corrientemente alcanzan los 90 km/hr. La temperatura media anual es del orden de 2 grados bajo cero en las islas Shetland del sur y descienden hacia el interior llegando a 6° bajo cero. La nubosidad es siempre abundante y los cielos despejados raramente duran más de un día. La humedad relativa es superior al 80% debido a las bajas temperaturas que mantienen el aire muy próximo a la saturación [3].

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

A continuación, dada la variedad de climas presentes en cada macrozona y región del territorio chileno de norte a sur, con la intención de ofrecer una visualización del clima más focalizada posible se adjuntan datos de la temperatura media diaria y de las precipitaciones caídas durante el 2017 para las regiones de estudio destacadas: Antofagasta, Coquimbo y Libertador General Bernardo O'Higgins.

- **Antofagasta**

En el caso de Antofagasta, se ofrecen los datos de dos estaciones de medida para ofrecer una visión más completa del clima de la región. En ambos casos se puede observar parecida tendencia en temperatura, observándose valores más fríos en El Loa (zona interior) que en El Cerro Moreno (zona costera). Las temperaturas son escasas en general observándose los picos de precipitaciones en los meses de invierno.



Figura 3-5. Estación del Cerro Moreno, Antofagasta. Temperatura media diaria (2017) [4]



Figura 3-6. Estación de El Loa, Antofagasta. Temperatura media diaria (2017) [4].

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2



Figura 3-7. Estación de El Cerro Moreno, Antofagasta. Precipitación caída y normal (2017) [4]

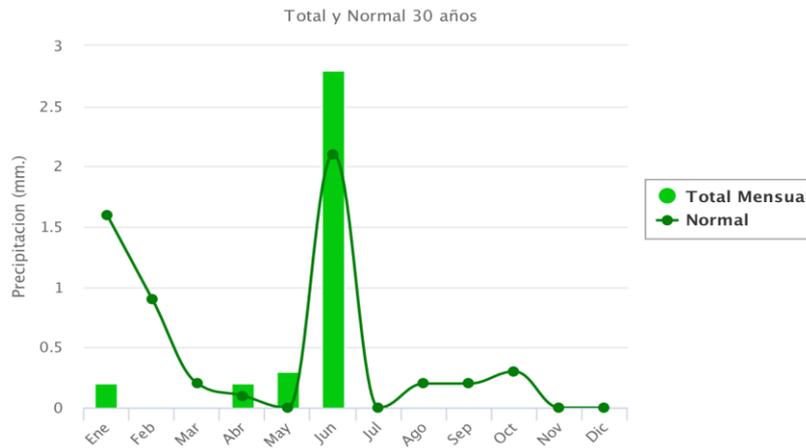


Figura 3-8. Estación de El Loa, Antofagasta. Precipitación caída y normal (2017) [4]

- **Coquimbo**

En la región de Coquimbo se registran valores mínimos por encima de los 10° en invierno y las mayores precipitaciones en los meses de invierno siendo bastante más copiosas que en la región de Antofagasta.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2



Figura 3-9. Estación de la Serena, Coquimbo. Temperatura media diaria (2017) [4]

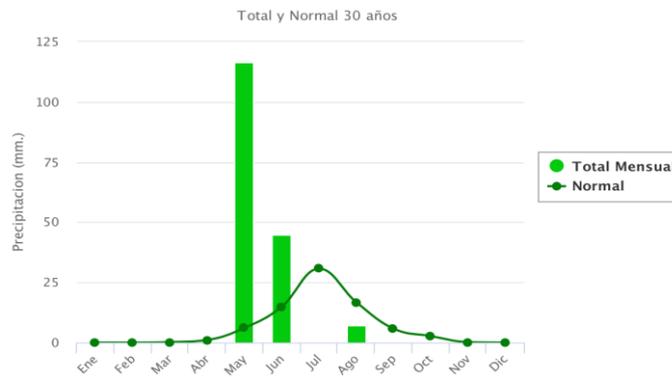


Figura 3-10. Estación de La Serena, Coquimbo. Precipitación caída y normal (2017) [4]

- **Libertador General Bernardo O'Higgins**

En el caso de la región del Libertador General Bernardo O'Higgins, se propone la estación de General Freire (Curicó) por cercanía y por la ausencia de estación monitorizadora de la información en dicha región. Las temperaturas son similares a las de la región de Coquimbo, pero las precipitaciones se presentan algo más intensas en los meses de invierno.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2



Figura 3-11. Estación de General Freire, Curicó. Temperatura media diaria (2017) [4]

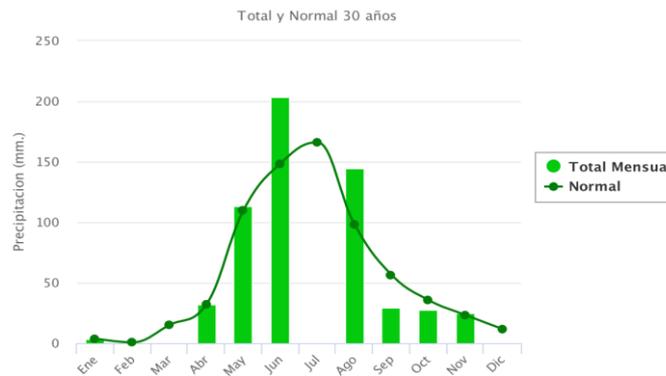


Figura 3-12. Estación de General Freire, Curicó. Precipitación caída y normal (2017) [4]

3.1.2. Geología y sismología

Chile presenta 4.200 km de largo con un ancho máximo de 375 km y uno mínimo de unos 90 km, el cual conforma una estrecha lengua de tierra custodiada en todo su largo por dos grandes cordilleras: de los Andes y de la Costa, entre las cuales se encuentra la Depresión Intermedia. Al este, se encuentra la Cordillera de los Andes la cual presenta cumbres que alcanzan los 7.000 m. Esta cordillera forma el límite natural con Argentina y Bolivia. Al oeste, las alturas de la Cordillera de la Costa son menores – un máximo de 3.000 metros en el norte- y van disminuyendo a medida que se avanza al sur. En las zonas del Norte Chico y Central existen los llamados Valles Transversales, que van desde la Cordillera de los Andes hasta el mar [5].

La macrozona norte el territorio presenta rasgos morfológicos marcados en cuanto a los principales sistemas longitudinales del relieve, los que tipifican la fisonomía de gran parte del territorio chileno. Se caracteriza por presentar cinco formas de relieve que se extienden en sentido norte sur, con

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

características climáticas y morfológicas muy bien definidas: El Altiplano, la Cordillera de los Andes, la Depresión Intermedia, la Cordillera de la Costa y la Planicie Costera

En la zona centro, las principales formaciones geológicas son: la Cordillera de Los Andes, la Depresión Intermedia, la Cordillera de la Costa y las Planicies Litorales.

En la macrozona Sur los accidentes geográficos destacados en esta zona son: la Cordillera de los Andes, la Depresión Intermedia y la Cordillera de la Costa.

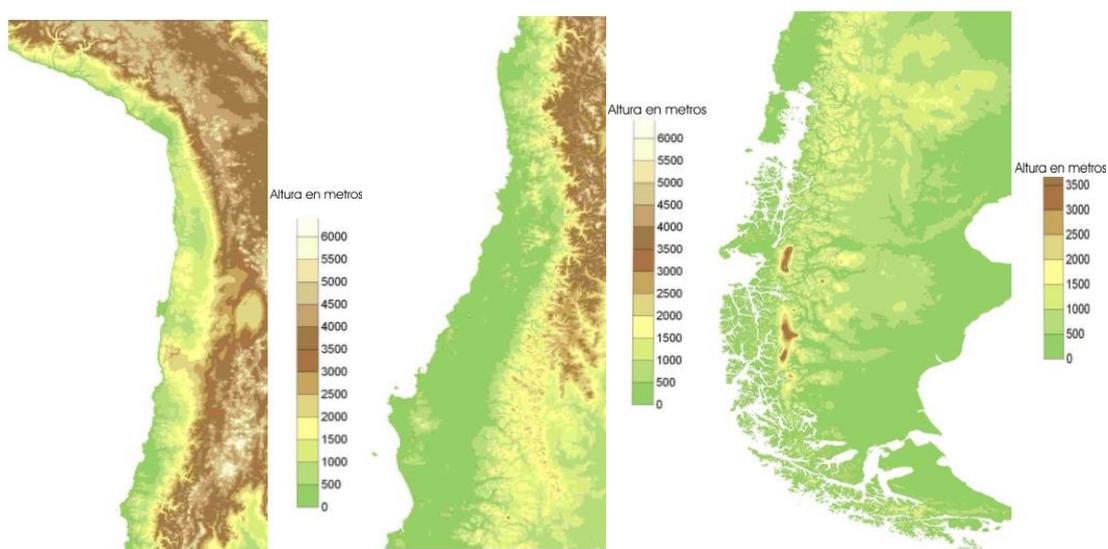


Figura 3-13. Nivel de altura por macrozonas [3]

Respecto a la sismología, Chile está ubicado sobre la placa Sudamericana, concretamente se encuentra en el borde occidental de dicha placa lugar donde convergen y se generan zonas de subducción de entre las placas de Nazca y Antártica [6]. Debido a esto, la geología de esta zona se caracteriza por esfuerzos tectónicos que inducen la generación de fallas. Estas interacciones son las responsables de los terremotos generados en todo Chile. Debido a la alta velocidad de convergencia entre Nazca y Sudamérica, la sismicidad de la zona en la que convergen es la más intensa y produce los mayores terremotos en el país.

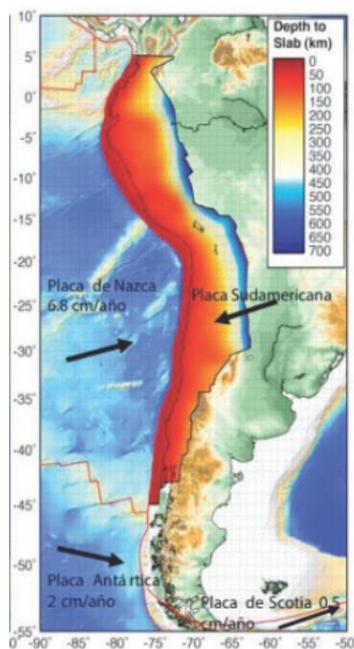


Figura 3-14. Marco tectónico de Chile: los colores indican la profundidad de la Placa de Nazca

La placa oceánica de Nazca es más densa que la continental de Sudamérica, por lo tanto, penetra bajo la de Sudamérica generando así una zona de subducción. La zona de subducción genera como consecuencia una fosa (*trench*) en el fondo del océano. En este punto se generan fuerzas de roce entre ambas placas que retienen el movimiento, solo cuando la fuerza de movimiento es mayor que la que se produce por el rozamiento entre ellas es cuando se producen los terremotos. El tamaño del terremoto (magnitud), es proporcional al área de la zona que se mueve y al desplazamiento del movimiento. Si durante el terremoto, el fondo oceánico se desplaza verticalmente, se generan los denominados "tsunamis". Estos son los sismos de mayor magnitud, siendo ejemplos de estos sismos el devastador terremoto de Valdivia de 1960 ($M_w=9.5$), y el fatal terremoto del Maule de 2010 ($M_w=8.8$). Son sismos que ocurren fuera de la costa continental, debido a la deformación en la placa de Nazca al tratar de introducirse bajo el continente. Por regla general en los terremotos sucedidos se tienen magnitudes menores que 8.0. Por ejemplo, el terremoto de 2001 ($M_w=6.7$), sucedido frente a las costas de Valparaíso.

Los sismos Intraplaca-oceánica son los sismos que ocurren dentro de la placa oceánica subductada debido al peso de la placa y fuerte acoplamiento interplaca. El daño potencial de estos sismos es mayor que el de los sismos interplaca de la misma magnitud. Por ejemplo, sismos de estas características fueron los terremotos de Chillan en 1939 ($M_s=8.3$), y Punitaqui en 1997 ($M_w=7.1$).

Los sismos Intraplaca-continental son sismos que ocurren dentro de la placa continental, en la corteza a profundidades menores que 30 km. Esto se debe a la deformación generada,

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

principalmente, por la convergencia entre las placas y por esfuerzos locales. La principal deformación generada por la subducción es el alzamiento de la cordillera de los Andes. En general, estos sismos ocurren en torno a la cordillera, tanto en Chile como en Argentina. Ejemplo de estos sismos es el terremoto de Las Melosas de 1958 (Mw=6.3).

Las zonas más probables de generar futuros terremotos son aquellas en las cuales ha transcurrido suficiente tiempo para acumular esfuerzos desde el último gran terremoto, constituyéndose en las llamadas “gaps” o “lagunas” sísmicas. El estudio de las características de los terremotos ocurridos en Chile y sus efectos en la superficie, ha permitido crear ordenanzas y normas de diseño y construcción, las que son modificadas y refinadas con el estudio de cada nuevo terremoto en el país. Esto ha significado que, en general, la infraestructura y obras civiles en Chile respondan satisfactoriamente en caso de terremotos, maximizando la seguridad y minimizando los costos.

3.1.3.Suelo

El análisis del suelo requiere de diferentes perspectivas para evaluar el desempeño ambiental del mismo. Las perspectivas deben abarcar desde el propio uso del suelo y sus cambios a lo largo de los años como la calidad del mismo, la cual está estrechamente relacionada con la contaminación.

En Chile, el cambio de uso del suelo está relacionado con problemas de degradación, principalmente asociados a procesos erosivos y de desertificación [7]. Sin embargo, la degradación del suelo también está relacionada con la contaminación del mismo ya que hace que pierda sus facultades. Según la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, por sus siglas en inglés) la degradación de los suelos se define como “un cambio en la salud del suelo resultando en una disminución de la capacidad del ecosistema para producir bienes o prestar servicios para sus beneficiarios” [8]. A continuación, se describen los procesos de degradación en el territorio chileno:

a. Desertificación de los suelos

El riesgo que presenta el territorio a la desertificación es en mayor medida de carácter moderado lo que implica, a su vez, un mayor número de habitantes afectados por este fenómeno.

b. Erosión de los suelos

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

La pérdida y degradación de los suelos puede darse por erosión, concretamente en el territorio chileno, es la primera causa de degradación. La erosión puede producirse por fenómenos naturales, así como por la acción del ser humano, que como consecuencia de las acciones llevadas a cabo se favorezca la incidencia de los fenómenos naturales erosivos. Es importante destacar que la erosión producida en Chile a lo largo de los años está también estrechamente relacionada con la fragilidad de los ecosistemas que presenta.

Además de la erosión, otros factores como la acidificación, salinidad y alcalinidad, pérdida de materia orgánica y destrucción de la estructura y las actividades antropogénicas, suponen un riesgo para la degradación de los suelos [9].

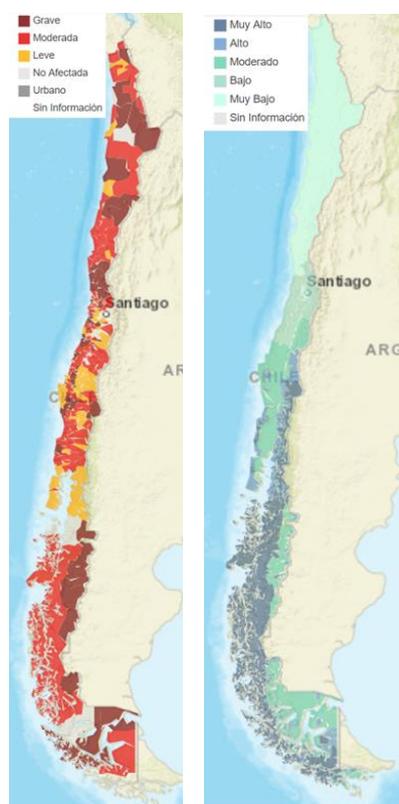


Figura 3-15. Efecto de la desertificación y la erosividad sobre el territorio [10] y [11]

En el caso de las regiones de estudio, la región de **Antofagasta** presenta una erosividad en el territorio muy baja lo cual es un aspecto para valorar de cara a plantear cambios de uso del suelo en el mismo. Sin embargo, el tema de la desertificación en esta misma región oscila entre leve, moderada y grave dependiendo del terreno. La región de **Coquimbo** también ofrece un grado de erosividad muy bajo a lo largo de toda la región, pudiendo presentar al sur de la misma un grado de erosividad algo más alto. La desertificación en esta región es bastante constante a lo

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

largo de todo el territorio, siendo de grado moderado principalmente. Por último, la región del **Libertador General Bernardo O'Higgins** presenta un grado de erosividad que oscila entre moderado y bajo, siendo prioritariamente bajo. Y respecto a su grado de desertificación, presenta diferentes niveles en función del territorio estudiado oscilando entre moderado y leve, pudiendo encontrarse zonas con un nivel de desertificación grave.

c. Contaminación de los suelos

La contaminación de los suelos con sustancias que limiten sus capacidades o las anulen es otra forma de degradación. En el caso de Chile, la contaminación de los suelos proviene principalmente de las actividades agrícolas, industriales y mineras.

- Contaminación por la actividad agrícola

El uso de agroquímicos es una práctica habitual en el sector agrícola, contribuyendo a la contaminación de los suelos. En el territorio de Chile la zona con más actividad agrícola está concentrada en la zona centro y sur.

- Contaminación por la actividad minera e industrial

La superficie afectada de suelos por la actividad minera e industrial se estima en 60.000 ha, destacando las regiones de Valparaíso y Libertador General Bernardo O'Higgins. En estas regiones se han encontrado concentraciones significativas de contaminantes en los suelos relacionados con las actividades mineras e industriales. Las minas que se encuentran actualmente en funcionamiento se ubican en gran medida en las regiones de Tarapacá, Valparaíso, Antofagasta y Atacama. Los recursos minerales extraídos principalmente son cobre y hierro. Las actividades mineras son acciones que suponen un elevado impacto al suelo ya que interfieren drásticamente en su estado natural. La presencia de metales como el cobre y el cadmio presentan concentraciones inusualmente altas en las regiones de Valparaíso, Metropolitana y Libertador General Bernardo O'Higgins. Mientras que, en las regiones de Coquimbo y Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo, se han encontrado valores altos de manganeso, plomo y zinc [12]. Además de las actividades mineras, las industrias también suponen una fuente de contaminación de los suelos. Las centrales termoeléctricas son de las actividades industriales que más contribuyen a la contaminación de los suelos.

A continuación, se muestra una gráfica que muestra los diferentes grados de suelos contaminados por regiones.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

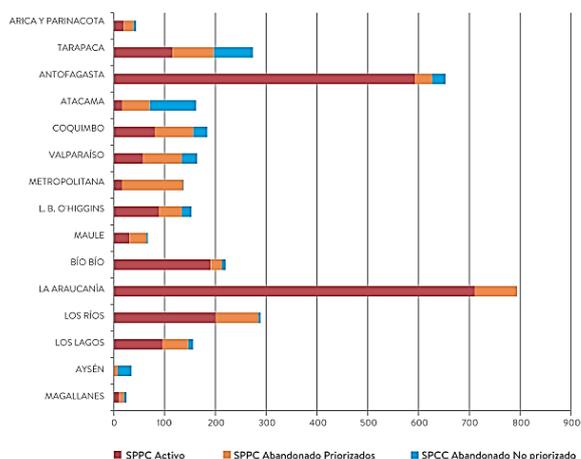


Figura 3-16. Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes (SPPC) [7]

3.1.4. Hidrología

A nivel general, respecto a la hidrología del país se puede determinar que en términos de disponibilidad de agua puede considerarse un país rico en materia de recursos hídricos. Respecto al agua superficial procedente de los fenómenos de escorrentía se alcanzó un valor de 53.000 m³/persona/año, valor alto considerando que la media mundial alcanza el valor de 6.600. Si bien es cierto que este valor es muy variable provocando la escasez de agua en zonas como la norte y la central del país. Por otro lado, respecto al agua superficial los lagos, la nieve y los glaciares contribuyen a esta reserva hídrica. En cuanto a recursos de agua subterráneos, Se estima que Chile posee un importante volumen de recursos subterráneos y que la recarga media estimada alcanza aproximadamente 55m³/s desde la región Metropolitana al norte. Al sur de la región Libertador General Bernardo O'Higgins no se tiene información detallada del potencial de recarga, debido a la menor importancia de las aguas subterráneas como fuente de abastecimiento. No se tiene información consolidada sobre el potencial de recarga al sur de la región Los Lagos [13].

A continuación, se describe la situación hídrica tanto de agua superficial como de agua subterránea de Chile para lo cual se ha contado con la información publicada por la Dirección General de Aguas (DGA) a través del Atlas del agua 2016 [14].

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

a. Glaciares

Los glaciares son masas de agua terrestre en estado sólido que se encuentran encerradas por los elementos topográficos en los que se encuentran situados, los cuales fluyen por deformación de su estructura interna. La existencia y preservación de los glaciares cobra especial importancia en el momento en el que el Panel Gubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) los ha considerado elementos clave a la hora de estudiar los efectos del cambio climático en la superficie terrestre. Como consecuencia de esto, los glaciares están retrocediendo a lo largo de todo el planeta afectando a la escorrentía, recursos hídricos, etc.

Según los datos publicados en 2015 por la DGA, la distribución de los glaciares a lo largo de Chile se encuentra muy focalizada en la macrozona Austral, acumulándose en esta zona alrededor del 92% de la extensión cubierta por glaciares de todo el país. La superficie cubierta por glaciares en Chile supone un 3,1% de la superficie total del país y un 80% de la superficie cubierta por glaciares de todo Sudamérica.

La región de **Antofagasta** presenta una superficie cubierta del 0,03% del total del país, con una superficie de 7,2 km². La región de **Coquimbo** contribuye al total con un porcentaje del 0,2% lo que equivale a una superficie de 46,9 km². Y, por último, la región del **Libertador General Bernardo O'Higgins** presenta una superficie de 1,24% cubierta por glaciares o, lo que es lo mismo, una superficie 292,3 km². En total, las tres zonas presentan un porcentaje de glaciares que no llega al 2% del total del territorio, de manera que no se considera que sean fenómenos de importancia en estas tres regiones de estudio.



Figura 3-17. Glaciar Pío XI, en la región de Magallanes en la macrozona Austral

b. Ríos y escorrentía

A nivel general, los ríos del territorio chileno comparten características comunes como su longitud ya que se trata generalmente de ríos de poca longitud y la peculiaridad es que presentan una diferencia marcada en su caudal en función de los meses del año. La mayoría de los mismos nacen en Los Andes y desembocan en el mar, fluyendo de este a oeste.

Según la información publicada por la DGA, en 2014 el río que presenta un mayor caudal medio a lo largo del año es el río Baker con un caudal anual medio de 903,3 m³/s, el cual se encuentra en la macrozona Austral, en la región Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo. Le sigue el río Palena que se encuentra en la misma región, pero también comprende parte del territorio de la región Los Lagos, de la macrozona Sur. El conjunto de ríos más caudalosos se encuentra en la macrozona Sur y Austral, mientras que en la Norte y en la Centro, a pesar de encontrarse uno de los más largos de todo el territorio, no llegan a ser tan caudalosos.



Figura 3-18. Río Baker, región Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo

En la región de **Antofagasta** se encuentra el río de mayor longitud de todo el país, el río Loa, que presenta una longitud de 440 km, sin embargo, se trata de uno de los menos caudalosos. En la región de **Coquimbo** se registran cuatro ríos que son el río Huasco que comparte localización con la región fronteriza de Atacama, el río Elqui, el río Limarí y el río Choapa. Por último, en la región de **Libertador General Bernardo O'Higgins** se registran el río Maipo, el río Rapel y el río Mataquito, los cuales comparten localización con otras regiones fronterizas.

c. Lagos y lagunas

Los lagos y lagunas suponen, a nivel mundial, un 0,62% del recurso hídrico disponible para uso en las actividades humanas y productivas. En el territorio chileno, se han registrado un total de 368 lagos y 12.416 lagunas a lo largo de todo el territorio constituyendo un total de 12.784 cuerpos de agua.

De nuevo, la macrozona que mayor número de lagos y lagunas presenta es la Austral, seguido de la macrozona Sur, mientras que la macrozona Norte y Centro constituyen en total menos del 4% del total de cuerpos acuáticos. Uno de los lagos más representativos de todo el país, que se encuentra en la macrozona Austral, es el Lago General Carrera con una extensión de 964,7 km². Le sigue el Lago Llanquihue, con una superficie de 867,1 km², en la macrozona Sur.

La región de **Antofagasta** presenta un área de 83 km² cubierta por lagos y lagunas lo que representa un 0,7% del total del país. La región de **Coquimbo** es de las que menos área de lagos y lagunas presenta con un área de 8 km², lo que supone un 0,1% del total. Por último, la región de **Libertador General Bernardo O'Higgins** presenta un área de 20 km², o lo que es lo mismo, un 0,2% del total.

d. Acuíferos

Los acuíferos suponen las reservas de agua subterránea de un país que tienen como origen las precipitaciones que se filtran por las capas superiores de tierra hasta conformar la masa de agua.

La DGA en 2015 registró un valor de 137 acuíferos en todo el territorio nacional, los cuales se encuentran distribuidos en las macrozonas Norte, Sur y Centro, no habiéndose registrado ninguno en la zona Austral hasta la fecha. La macrozona con mayor cantidad de acuíferos es la macrozona Sur, seguido de la Centro y, por último, la Norte. La región con mayor cantidad de acuíferos es la región Los Lagos con un total de 31 acuíferos, que constituyen un 22,7% del total de los acuíferos registrados hasta la fecha.

La región de **Antofagasta** presenta ocho acuíferos, mientras que la región de **Coquimbo** recoge seis acuíferos en su territorio y, por último, la región del **Libertador General Bernardo O'Higgins** presenta once, siendo en porcentaje el 5,8%, 4,4% y 8,0% de total nacional, respectivamente.

e. Calidad del agua

Una vez identificados los principales focos de agua y caracterizada su distribución por las macrozonas, es necesario hacer especial mención a la calidad del agua que conforma los recursos hídricos de Chile.

De acuerdo con el Diagnóstico de la gestión de los recursos hídricos publicado por el Banco Mundial en 2011 la falta de datos sistemáticos limita una evaluación exacta y detallada del alcance del estado de la calidad de las aguas y resulta un obstáculo para la gestión de los recursos hídricos. La red de monitoreo es insuficiente para caracterizar adecuadamente los ríos, lagos, estuarios y zonas costeras del país. En 2011 existían áreas del territorio donde no se disponía de información de calidad del agua. La red mínima de lagos considera exclusivamente 14 de los 375 lagos con superficie de mayor de 3km². Los lagos costeros son actualmente los cuerpos de agua más vulnerables debido a que reciben la carga contaminante proveniente del valle central y estos no son considerados dentro de la red mínima. La información disponible sobre el estado ambiental de estos lagos costeros proviene fundamentalmente de fuentes de información de algunas ONG [13]. Además, existe un escaso entendimiento e información de los ecosistemas acuáticos.

Sin embargo, las estaciones repartidas a lo largo del territorio permiten evaluar ciertos parámetros y poder hacer una evaluación general del estado de los recursos hídricos. El territorio chileno presenta una red de calidad de aguas con diferentes estaciones repartidas a lo largo del país. Estas redes de calidad de agua evalúan diferentes parámetros y sus variaciones a lo largo del tiempo, en este caso se describen el pH, la temperatura, el oxígeno disuelto en la misma y la conductividad eléctrica¹.

Respecto al pH, los ríos presentes en la macrozona Norte, alrededor de un 70%, presentan un pH neutro (es decir, entre 6,1 y 8,0), le siguen los ríos con pH alcalino (entre 8,1 y 14,0) con un 25% y, por último, alrededor de un 5% de los ríos presentan pH ácido (entre 0 y 6,1). En la macrozona centro, se repite la tendencia de la Norte, con un gran predominio de los ríos con pH neutro. En este caso, alrededor de un 94% de los ríos presentan pH neutro, un 15% pH alcalino y un 1% pH ácido. La macrozona Centro, acusa más esta tendencia de pH neutro siendo alrededor del 98% con estas características. El resto son ácidos y alcalinos. Por último, todos los cuerpos acuáticos de la macrozona Austral presentan valores de pH neutros.

¹ Todos los datos hacen referencia al año 2016 y la fuente es la DGA

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

La temperatura del agua, factor de especial importancia a la hora de mantenerse el equilibrio del ecosistema, es un indicador de distintos fenómenos que se pueden producir en el territorio como actividad volcánica o térmica, así como desajustes en el tipo y cantidad de bacterias que pueden encontrarse en la misma. Como es de esperar, las temperaturas del agua de los recursos hídricos presentan un gradiente de norte a sur, así como en función de las cotas de altura. En la macrozona Austral, todos los ríos se encuentran entre 10° y 1° C. En la macrozona Sur y Centro, oscilan entre 5° y 20° C, mientras que en la macrozona Norte el rango de temperaturas oscila entre 40° y 15° C.

El oxígeno disuelto es un elemento importante en el desarrollo de la vida en el medio hídrico además de suponer un indicador del correcto equilibrio entre los ecosistemas. Mayores niveles de oxígeno disuelto se relacionan con un menor grado de contaminación y con mayor calidad del agua. Los recursos hídricos que presentan un mayor nivel de calidad del agua son los que se encuentran distribuidos por la macrozona Austral, seguidos por los de la macrozona Sur con unos valores de oxígeno disuelto en agua de entre 7 y 15 mg oxígeno/L. En la zona Centro y Sur, hay más disparidad de datos, abarcando un rango entre 0 y 11 mg oxígeno/L.

Una vez descrito el sistema hídrico del territorio chileno, se describen las zonas declaradas zonas de agotamiento en 2016, parámetro que determina que ese recurso, ya sea un lago, laguna o río, no permite realizar actividades de aprovechamiento sobre el mismo.

El mayor número de zonas declaradas de agotamiento por macrozonas lo presenta el Centro con 5 zonas declaradas que suponen 9.571 km², sin embargo, la macrozona Norte presenta 4 zonas de agotamiento que cubren una superficie de 62.255 km². Por último, la macrozona Sur presenta 2 zonas de agotamiento, que suponen 4.305 km² y la macrozona Austral que no presenta ninguna.

En la región de **Antofagasta** se declaró zona de agotamiento el río Loa y sus afluentes en el año 2000 abarcando un área de 33.081 km², además de la cuenca del río Vilama y sus afluentes (2017). En la región de **Coquimbo**, lo fue el río Elqui y sus afluentes (2015), el río Grande, el río Limarí y sus afluentes (2005) y, por último, el río Choapa y sus afluentes (2004). La región del **Libertador General Bernardo O'Higgins** presentó zonas de agotamiento en la primera sección del río Mapocho y sus afluentes en 1983 y el río Estero Chimbarongo y sus afluentes en 1999.

3.1.5. Contaminación atmosférica

Uno de los parámetros ambientales más relevantes a la hora de analizar la situación ambiental de un país para la implantación de nuevas tecnologías o para el desarrollo de sectores industriales es la calidad del aire. La calidad del aire viene determinada por la contaminación atmosférica, la cual puede definirse como la presencia en la atmósfera de sustancias que impliquen molestia grave, riesgo o daño para la seguridad o la salud de las personas, medioambiente y demás bienes de cualquier naturaleza [15]. Las sustancias consideradas contaminantes atmosféricos componen un gran número las cuales conllevan distintas repercusiones al medio y a la salud. Sin embargo, es posible hacer una priorización de los mismos, bien porque sean más habituales o porque se generen en mayor cantidad. Entre ellos destacan los que se originan por la acción de la producción de la energía y el transporte, como son el monóxido de carbono (CO), el dióxido de azufre (SO₂), los óxidos de nitrógeno (NO_x) y las partículas. De otros sectores como la agricultura y la ganadería, destaca el amoniaco (NH₃). Todos estos se consideran contaminantes primarios, pero como contaminante secundario mencionar el ozono (O₃) que tiene efectos negativos en la troposfera. Por último, los metales pesados y compuestos orgánicos volátiles (COVs) presentan elevado riesgo para el medio y la salud humana, debido a su persistencia y peligrosidad. La concentración y presencia de todos estos contaminantes atmosféricos van a determinar la calidad del aire de una región.

La descripción de la calidad del aire en el territorio chileno debe hacerse dividiendo en macrozonas el territorio ya que la diversidad que ofrece el país no permite establecer una visión general. En primer lugar, la macrozona Norte presenta una problemática asociada a la calidad del aire que se presenta como concentraciones elevadas de partículas, SO₂ y NO_x los cuales provienen en gran medida de las centrales termoeléctricas, como las presentes en la zona de Atacama², y de otras fuentes mineras. En la macrozona Centro, las emisiones al aire de contaminantes se deben a la actividad industrial, a las fuentes móviles y a las emisiones del sector residencial. Respecto a la macrozona Sur, se registran valores más altos en partículas durante los meses de invierno, consecuencia del consumo de leña en hogares para calefacción.

A nivel nacional, la fuente de los principales contaminantes se puede clasificar por tipología. A continuación, se muestra una tabla que refleja cuáles son las fuentes emisoras en porcentaje para el total de los principales gases emitidos.

² <http://www.enelgeneracion.cl/es/conocenos/nuestronegocio/centrales/Paginas/chiletermo.aspx>

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

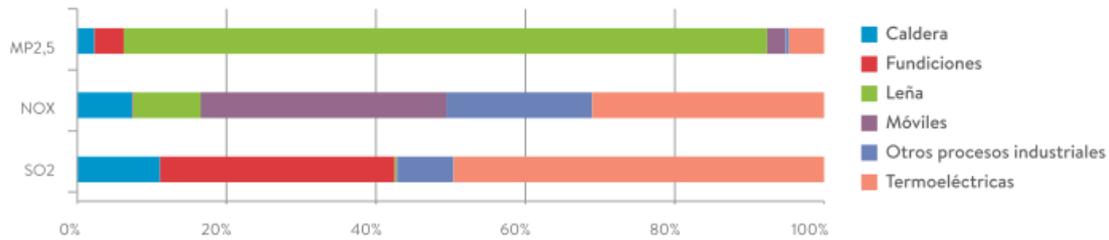


Figura 3-19. Contribución de las fuentes a la generación nacional de contaminantes (2017) [7]

El material particulado (de 2,5 micras) se genera principalmente por la combustión de la leña en un 90% aproximadamente, mientras que el resto se distribuye en las centrales termoeléctricas, las fuentes móviles, las industrias de fundición, combustión en calderas y otros procesos. Los óxidos de nitrógeno son generados por las centrales termoeléctricas y las fuentes móviles de manera similar, seguido de otros procesos relacionados con la industria. Por último, con una contribución del 15% en total, la combustión por calderas y la leña. Las centrales termoeléctricas son las fuentes que más contribuyen a la concentración de SO₂ de la atmósfera, seguido por las industrias de fundición y la combustión por calderas.



Todas estas emisiones son reguladas mediante la emisión de normativas de obligado cumplimiento por las industrias y fuentes emisoras. Desde que en 1998 se estableciera la normativa para la regulación del material particulado, han surgido otras normas con el objetivo de controlar las emisiones al aire, de manera que, actualmente, son regulados los siguientes compuestos: CO, O₃, NO₂, SO₂, Pb y material particulado de 10 (PM10) y 2,5 micras (PM2,5).

El conjunto de normas respecto a la calidad del aire fija los parámetros de concentración entre los que deben encontrarse los contaminantes especificados, de no ser así el área se declara zona saturada. Además, se establecen los niveles de emergencia ambiental, es decir, rangos de concentraciones que superados se consideren de riesgo.

A continuación, se describen las tres regiones de estudio como opciones para la instalación de centrales nucleares de potencia.

Figura 3-20. Zonas Saturadas por la contaminación atmosférica [85]

f. REGIÓN DE ANTOFAGASTA

La calidad del aire en esta región está afectada por las centrales termoeléctricas que se encuentran en la zona, las explotaciones mineras y fundiciones de cobre. Estas tres actividades industriales contribuyen a la contaminación atmosférica aumentando las concentraciones de material particulado, CO₂ y NO_x.

Para el control de la concentración de estos contaminantes, la región consta de las siguientes estaciones de monitoreo:

Tabla 3. Estaciones de medida de monitoreo de contaminantes atmosféricos de la región de Antofagasta

	Estaciones de medida
1	María Elena
2	Tocopilla
3	Calama
4	Sierra Gorda
5	Mejillones
6	Antofagasta
7	Taltal

A 2015, existían en la región de Antofagasta, cuatro zonas declaradas saturadas de PM₁₀ y una zona latente en elevadas concentraciones de SO₂.

De acuerdo con los datos de la calidad del aire, en el año 2016 se estableció un “Plan de Prevención de Descontaminación Atmosférica para la localidad de Huasco y su zona circundante” considerando que se declaró zona latente en PM₁₀. Por otro lado, en 2010 se estableció otro “Plan de Descontaminación Atmosférica para la ciudad de Tocopilla y su zona circundante” [15].

g. REGIÓN DE COQUIMBO

La región de Coquimbo presenta actividad minera por parte de la Minería Carmen de Andacollo y Los Pelambres. De cara a controlar estas emisiones se instalaron estaciones de monitoreo para la medición de PM_{2,5} en el año 2013 en las zonas de Coquimbo y La Serena. Las mediciones de estas estaciones vienen reportando niveles de concentraciones de PM_{2,5} menores a los niveles fijados por la normativa.

Tabla 4. Estaciones de medida de contaminantes atmosféricos de la región de Coquimbo

	Estaciones de medida
1	La Serena
2	Coquimbo
3	Andacollo
4	Salamanca
5	Los Vilos

En las regiones de Andacollo se instalaron estaciones de medición de PM10 desde que se registraron niveles de estas partículas por encima de los fijados por la norma. En 2009 se declaró la zona saturada en PM10 y, como consecuencia, en 2014 se estableció un Plan de descontaminación de Andacollo [15]. Respecto al resto de contaminantes, las fuentes fijas son las responsables de las emisiones de SO₂ y NO_x, mientras que las emisiones de PM10 y CO son causadas por las fuentes móviles (tránsito de vehículos) y, por último, las emisiones de PM2,5 son emitidas por las fuentes que consumen leña como combustible.

h. REGIÓN DEL LIBERTADOR BERNARDO O'HIGGINS

La principal fuente emisora de la región del Libertador Bernardo O'Higgins es la Fundición Caletones de la División El Teniente Codelco, aunque desde hace años cumple con las metas propuestas por el Plan de Descontaminación, lo que ha venido contribuyendo a la disminución de la concentración de contaminantes atmosféricos, principalmente de los contaminantes SO₂ y PM10.

Las estaciones de medida del cumplimiento de la norma diaria de concentraciones de PM10 en la región son las siguientes:

Tabla 5. Estaciones de medida de PM10 en la región del Libertador Bernardo O'Higgins

	Estaciones de medida
1	San Francisco de Mostazal
2	Rancagua
3	Rengo
4	San Fernando
5	Codegua
6	Sewell
7	Machalí

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

A 2015, la estación de Rancagua registró valores de PM10 y PM2,5 por encima de los establecidos por la norma diaria. En cuanto al área de influencia de la fundición de Caletones, las medidas llevadas a cabo por esta empresa para alcanzar los retos establecidos por el Plan de Descontaminación [15] han generado que los días de superación de la norma diaria de concentración de SO₂ sean menos. Sin embargo, a pesar de estas reducciones las concentraciones anuales de SO₂ en 2015 estaban por encima de la norma anual fijada. Respecto a otros contaminantes atmosféricos, las concentraciones de NO₂, SO₂ y O₃ han registrado valores por debajo de las normas.

Las descripciones detalladas de las zonas identificadas como posibles de cara al planteamiento de nuevas centrales nucleares de potencia permiten establecer una caracterización de la calidad del aire. A modo de resumen, en el norte predominan los contaminantes como consecuencia de la actividad minera y de las fuentes de las centrales termoeléctricas. Estos contaminantes son partículas, SO₂ y NO_x, principalmente. En la zona centro las emisiones están relacionadas con la actividad industrial, las fuentes móviles, las emisiones procedentes del sector residencial y de centrales termoeléctricas, siendo los principales contaminantes atmosféricos predominantes las partículas y contaminantes fotoquímicos. En la zona sur, se observan altos niveles de partículas en los meses de invierno por el consumo de leña para calefacción de hogares. Las declaraciones de zonas saturadas se llevan a cabo en función de la superación de los valores de norma diaria o de norma anual. Para el caso de estas últimas, se declaran los Planes de Descontaminación. Hasta el año 2016, se habían declarado los planes de descontaminación a las siguientes zonas saturadas: Tocopilla, Andacollo, Santiago, Valle de Rancagua y Temuco, principalmente por las concentraciones de material particulado [12].

3.2. Variables sobre el medio biótico

3.2.1. Flora y fauna

Dada su condición de isla biogeográfica, Chile está dotado de una gran diversidad de ecosistemas terrestres, marinos, costeros, glaciares, ríos, lagos, humedales y ecosistemas insulares, los que en su conjunto albergan cerca de 30.000 especies de plantas, animales, hongos y bacterias. A esto se suma un alto grado de endemismo de especies (22 a 25%), que transforman amplios espacios de Chile en verdaderos laboratorios naturales.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

La provisión de servicios ecosistémicos de la biodiversidad chilena es clave para el desarrollo económico del país y de sus habitantes. Los sectores que dependen directamente de los recursos naturales renovables, entre ellos la industria forestal, pesquera, agrícola y el sector turístico, dan cuenta del 9,7% del PIB del país y generan al menos un millón de empleos directos.

La biodiversidad de Chile (Figura 3-21) se caracteriza por un relativo alto endemismo de especies (22-25%) en ecosistemas diversos y de escaso tamaño, que albergan alrededor de 30.000 especies. La zona centro y sur de Chile es considerada como uno de los 35 *hotspots* mundiales de biodiversidad y clasificada también como una de las más amenazadas por la iniciativa Global 200 de WWF (*World Wildlife Fund*) y el Banco Mundial.



Figura 3-21. Zonas destacadas en biodiversidad

Chile cuenta con ecosistemas que proveen importantes servicios ecosistémicos, como es el caso de los sumideros de carbono. Concretamente los mayores sumideros de carbono se encuentran en la zona sur en la cual los bosques valdivianos representan una importante fuente de provisión de agua además de captura de carbono (Figura 3-22).

Por otro lado, el gran ecosistema marino de la corriente de Humboldt, por su parte, provee alta productividad a las costas del país y los ecosistemas mediterráneos son de gran relevancia por los servicios que prestan para el desarrollo de la industria agrícola. Las áreas protegidas, por su parte, también representan una fuente importante de valor económico. Chile basa su economía en la explotación de recursos naturales y, sin considerar el sector minero, que aporta con un 12% al PIB del país y un 60% de las exportaciones totales.

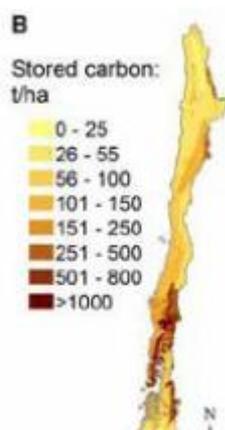


Figura 3-22. Zonas de captura de carbono por niveles de toneladas por hectárea

Los ecosistemas terrestres de Chile (Figura 3-1) han experimentado una importante pérdida de superficie de bosque nativo, lo que ha sido especialmente evidenciado en la zona central, llegando a experimentar tasas de pérdida entre un 3,5% y 4,5% al año. Por otro lado, en los últimos 20 años (1992 y 2012), se han identificado ecosistemas que han perdido alrededor de un 26% de su superficie dentro de este período, los cuales se ubican en la zona costera de la Región del Maule y la Región del Bío Bío, así como pérdidas un 10 a un 20% registradas en otros 11 ecosistemas de la zona central del país en los últimos 20 años, principalmente debido al establecimiento de nuevas plantaciones

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

forestales en dichas zonas. Los ecosistemas antrópicos, por su parte, han incrementado a un 12% del territorio su superficie.

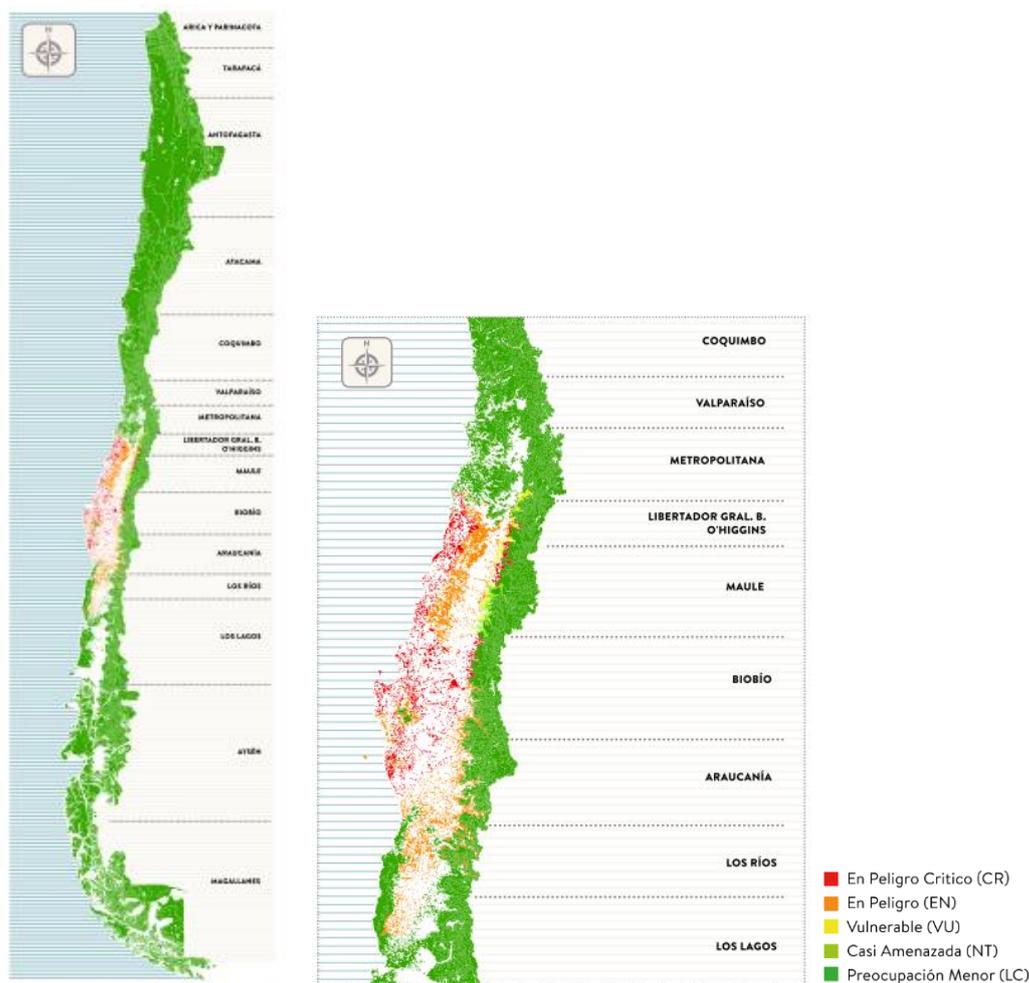


Figura 3-23. Estado de los ecosistemas terrestres, 2015 [16]

De acuerdo con lo publicado en el Informe del Estado del Medioambiente de Chile en 2016 (Figura 3-24) la región que presenta mayor cantidad de ecosistemas en peligro es la región del Libertador General Bernardo O'Higgins. Mientras que Coquimbo y Antofagasta el peor caso de conservación alcanza la categoría de vulnerable.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

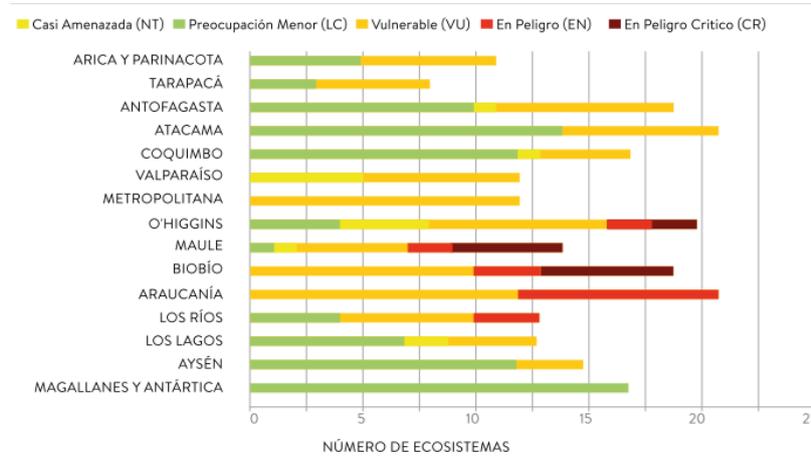


Figura 3-24. Estado de los ecosistemas terrestres por región, 2015 [16]

En el ámbito marino, no existe conocimiento suficiente que permita dar cuenta de la pérdida y/o alteración de los ecosistemas marinos y costeros ni las especies que los componen; tampoco existe una clasificación oficial que permita una adecuada planificación y gestión en torno a estos ecosistemas. El Índice de Salud General de los Océanos, estudio realizado a nivel global, señala que la biodiversidad marina de Chile y su estado de conservación se encuentra en un nivel “bueno” de conservación, no así mismo en cuanto con la provisión de alimento por las pesquerías y la acuicultura, lo cual da cuenta de la sobreexplotación que enfrentan las especies hidrobiológicas. Las islas oceánicas, a su vez enfrentan serios problemas de conservación por la introducción de especies exóticas invasoras, la ausencia de una gestión territorial integral y el manejo sustentable de sus recursos, entre otros aspectos.

En los ecosistemas acuáticos continentales, por su parte, la ausencia de datos, de información sistematizada y el monitoreo de estos ecosistemas, también impide contar con un completo panorama del estado de sus componentes. De todas maneras, en forma general, la información disponible indicaría que la condición ecológica es mejor hacia el sur de Chile y que empeora hacia la zona centro -en el caso de ríos y lagos- y hacia la zona norte del país. En el caso de las especies, si bien se ha ampliado el conocimiento de la biodiversidad de especies en Chile, existe un considerable desconocimiento de la biota presente, siendo los invertebrados y los peces los grupos menos conocidos. De las especies descritas, los anfibios es el grupo que se encuentran más amenazado, seguido de los mamíferos y los reptiles. De acuerdo con lo publicado en el Informe del Medioambiente de Chile en 2016 el número de especies amenazadas era de 728, de las cuales el 66% se encontraba en peligro crítico [16].

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

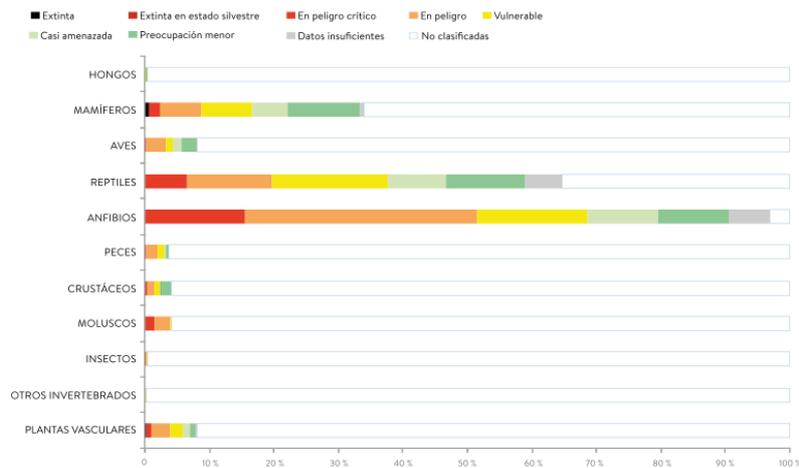


Figura 3-25. Porcentaje de especies clasificadas, 2015 [16]

El cambio de uso de los suelos constituye el principal factor antrópico que ha ocasionado cambios en los ecosistemas terrestres naturales del país, siendo las actividades desarrolladas por la industria forestal -a través de la tala irregular de los bosques y las plantaciones con especies exóticas, por la industria agrícola - a través del despeje de bosques para el establecimiento de pastizales y cultivos- y por la urbanización, las mayores amenazas para estos cambios. Otras amenazas lo constituyen la introducción de especies exóticas invasoras, los incendios forestales, el cambio climático y los grandes volúmenes de agua que extrae el sector minero y el sector agrícola en la zona norte del país para el desarrollo de sus actividades productivas.

Respecto al impacto sobre servicios ecosistémicos y el bienestar humano, pese a que se ha evidenciado la pérdida creciente de tierras de alto valor en biodiversidad que son refugio de biota nativa, no se cuenta con información de estudios que hayan podido determinar impactos en servicios asociados a la sustitución de vegetación nativa por plantaciones forestales y avance de la frontera agrícola. Sin embargo, sí se han identificado determinados servicios críticos en la zona centro y sur, tales como el servicio de captura de carbono y de refugio de hábitat, entre otros, y existe la noción del impacto sobre el servicio de provisión de agua en la zona norte del país, producto del desarrollo de industrias productivas. En el ámbito marino, por su parte, estaría afectado el servicio provisión de especies comerciales [17].

3.3. Variables socioeconómicas

3.3.1. Demografía

Chile es un país dividido administrativamente en 15 regiones y con más de 18 millones de habitantes. Según las proyecciones demográficas [18], la población en Chile estimada al 30 de junio de 2015 fue de 18 millones de habitantes (18.006.407), de los cuales un 49,5% correspondió a población masculina y un 50,5%, a población femenina. En concordancia con la ocupación histórica del territorio, las regiones de Valparaíso, Bío Bío y Metropolitana de Santiago son las que concentran la mayor parte de la población, con un 62,5% de ella (11.254.219 personas). La Región Metropolitana de Santiago, que alberga a la capital nacional, es la más poblada de Chile, con 7,3 millones de personas aproximadamente, lo que corresponde a un 40,7% de la población total del país.

En contraste, y también respondiendo al poblamiento histórico del país, las regiones extremas son las menos pobladas. Se estima que en el norte, Arica y Parinacota y Tarapacá concentran un 1,3% y 1,9% de la población nacional, respectivamente, sumando 575.895 personas; por otro lado, en el extremo sur, Aysén y Magallanes y de la Antártica Chilena concentran un 0,6% y un 0,9% de la población del país, respectivamente, sumando un estimado de 272.989 personas.

Tabla 6. Poblaciones publicadas por el INE para el año 2017³

Región	Población
<i>Antofagasta</i>	607.534
<i>Coquimbo</i>	757.586
<i>Libertador General Bernardo O'Higgins</i>	914.555

Chile presenta bajos niveles de fecundidad y mortalidad, en la actualidad se reflejan en una tasa bruta de natalidad de 13,6 por mil, una tasa global de fecundidad de 1,79, una tasa de mortalidad infantil de 6,9 por mil y una tasa bruta de mortalidad de 5,7 por mil. Estos bajos niveles se manifiestan tras un declive sostenido de más de 60 años aproximadamente, que finalmente se han traducido en el envejecimiento paulatino de la población. Esto se ve reflejado en la esperanza de vida al nacer, la que presenta valores de 77,1 años para los hombres y 82,7 años para las mujeres, y en el aumento sostenido del peso relativo de la población adulto mayor, que actualmente representa casi al 15% del total del país.

³ <https://resultados.censo2017.cl/>

3.3.2. Sector agropecuario

El sector agropecuario ha sido un sector fuertemente influenciado por la exportación de productos, lo cual ha influido en su desarrollo generando consecuencias en los tipos de asentamiento de suelo, el impacto ambiental del sector, etc.

La distribución del sector agropecuario se da a lo largo de todo el país, aunque hay zonas que concentran ciertas actividades relacionadas con este sector. En la Tabla 7 se detalla el número de explotaciones presentes en cada región en el año 2007, así como su superficie dedicada a labores agrícolas y totales.

Tabla 7. Características del sector agropecuario en Chile, Censo 2007 [19]

Regiones	N.º explotaciones	Explotaciones sobre el total	Superficie agrícola utilizada	Superficie total de explotaciones
		%	ha	ha
Arica y Parinacota	2.497	1%	175.573	550.143
Tarapacá	1.979	1%	501.553	566.038
Antofagasta	2.000	1%	668.335	720.457
Atacama	2.925	1%	109.484	3.909.235
Coquimbo	15.777	5%	3.262.067	4.006.060
Valparaíso	17.734	6%	510.347	1.415.593
Metropolitana	12.805	4%	338.679	1.318.511
O'Higgins	25.249	8%	777.020	1.609.564
Maule	41.904	14%	1.754.538	2.706.054
Bío Bío	62.797	21%	1.950.728	3.191.456
La Araucanía	58.069	19%	1.788.710	2.899.692
Los Ríos	16.529	5%	699.498	1.674.269
Los Lagos	35.717	12%	962.178	4.562.293
Aysén	4.002	1%	776.774	10.219.165
Magallanes	1.392	0%	4.197.645	12.347.203
Total	301.376	100%	18.473.128	51.695.733

De acuerdo con el último censo realizado la región con mayor actividad agropecuaria en general es la región Bío Bío en cuanto a número de explotaciones. La región de Antofagasta presenta 2.000

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

explotaciones agropecuarias que suponen una superficie de 566.038 ha, mientras que Coquimbo presenta 15.777 las cuales suponen 4.006.060 ha y, por último, la región del Libertador General Bernardo O'Higgins presenta 25.249 explotaciones y 1.609.564 ha.

Respecto a los cultivos en cada región, según el Censo de 2007 [19], se distribuyeron de la siguiente manera para las regiones del caso de estudio:

Tabla 8. Distribución de cultivos en las regiones de estudio, Censo 2007

	Antofagasta	Coquimbo	O'Higgins
Forrajeras	45,5%	54,5%	38,8%
Plantaciones forestales	24,7%	20,3%	21,5%
Hortalizas	14,5%	8,0%	15,6%
Cereales	7,7%	7,5%	9,9%
Huertos caseros	3,6%	4,1%	4,7%
Frutales	2,8%	2,3%	3,6%
Semilleros y almacigos	0,6%	2,0%	3,3%
Viñas y parronales	0,3%	0,5%	1,5%
Flores	0,2%	0,3%	1,0%
Leguminosas y tubérculos	0,2%	0,3%	0,1%
Viveros	0,1%	0,1%	0,1%
Cultivos industriales	0,0%	0,0%	0,0%

En la región de Antofagasta, las principales especies hortícolas cultivadas son choclo, zanahoria, haba, ajo, lechuga. En la región de Coquimbo, los cultivos de hortícolas se encuentran distribuidos en más especies que son alcachofa, lechuga, poroto verde, ají, choclo, pimiento, apio, pepino dulce, haba y zanahoria. Por último, la región del Libertador General Bernardo O'Higgins cultiva las siguientes hortalizas: zapallo, choclo, cebolla, tomate, ajo, poroto granado y pimiento, principalmente.

En cuanto a la actividad ganadera, predomina la faena porcina sobre el resto. En la categoría de ganado bovino, la región Los Lagos es la que más actividad presenta con una presencia de 894.998 cabezas en el año 2015. Las regiones de Antofagasta y Coquimbo no ofrecen actividad ganadera reseñable, sin embargo, la región del Libertador General Bernardo O'Higgins presentaba en 2015, 60.491 cabezas de ganado bovino. En la categoría de ganado ovino, la mayor presencia de cabezas se encuentra en la región de Magallanes con 1.648.599. De nuevo, las regiones Antofagasta y Coquimbo no presentan gran actividad en esta categoría, mientras que la región del Libertador General Bernardo O'Higgins concentró 131.622 cabezas en 2015. Respecto a la categoría de ganado

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

caprino, es Coquimbo la región con mayor concentración de esta actividad ganadera con 249.989 cabezas en 2015. En este caso, la región del Libertador General Bernardo O'Higgins presentaba 18.000 cabezas y Antofagasta no ofrece actividad ganadera de esta categoría. La categoría predominante en la actividad ganadera en Chile es la porcina, alcanzando en 2016 2.752.035 cabezas [5].

4. EFECTOS DE LAS CATEGORÍAS DE IMPACTO DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA SOBRE LAS VARIABLES AMBIENTALES

4.1. Etapas de la generación de energía nuclear estudiadas: el ciclo de combustible nuclear y vida de una central nuclear

En el Informe 1 se realizó una descripción de las distintas etapas del ciclo de combustible nuclear así como las fases de la vida de una central nuclear. El ACV se llevó a cabo sobre cada una de estas etapas en base a una serie de categorías de impacto. En este capítulo 4, se evalúan los efectos de dichas categorías de impacto sobre las variables ambientales que caracterizan el medio. Para contextualizar los próximos apartados, a continuación se resume esquemáticamente cada una de las etapas de las que consta la generación de energía nuclear:

- Ciclo de combustible. Proceso que contempla todas las fases comprendidas entre la extracción del mineral de uranio para la fabricación del combustible nuclear hasta la gestión definitiva de los residuos radiactivos generados por las centrales nucleares. Se desglosa en las siguientes etapas:
 - Minería y fabricación de concentrados. Fase de extracción del mineral y producción de concentrados de uranio.
 - Conversión. Proceso de purificación del óxido U_3O_8 presente en el concentrado y transformación en compuesto gaseoso (UF_6) necesario para la separación isotópica.
 - Enriquecimiento. Proceso por el cual aumenta la concentración isotópica del isótopo fértil del uranio ($U-235$) alcanzando un valor en torno al 3-4%.
 - Fabricación del combustible. Etapa en la que se tiene lugar la conversión química de UF_6 enriquecido en polvo de óxido UO_2 , la fabricación de las pastillas de combustible y la producción y ensamblado de las barras de combustible.
 - Operación. Etapa que comprende las fases de quemado del combustible, recarga y almacenamiento en piscinas.
 - Almacenamiento del combustible nuclear: Ciclo Abierto. En esta etapa el combustible nuclear irradiado se considera como residuo y se gestiona almacenándolo de manera definitiva.

- Reprocesado del combustible nuclear: Ciclo Cerrado. En esta fase se recupera el material fisible presente en el combustible gastado para volver a utilizarlo en la fase de operación.
- Fases de la vida de una central nuclear:
 - Construcción y puesta en marcha. Esta fase consiste en un conjunto de tareas que engloban la selección del emplazamiento, la planificación, el desarrollo de la obra civil, construcción y montaje de equipos y sistemas, instalación eléctrica y controlas de calidad de la instalación.
 - Operación. Esta etapa se resume en la quema del combustible nuclear para la obtención de energía eléctrica a través de reacciones de fisión en el núcleo del reactor nuclear. En esta fase tiene lugar la recarga del combustible en cada ciclo de operación y el almacenamiento en piscinas del combustible irradiado.
 - Desmantelamiento. Clausura de la central nuclear incluyendo todas aquellas tareas de descontaminación y gestión de residuos radiactivos generados.

4.2. Categorías de impacto

Tras llevar a cabo el ACV de la generación de energía nuclear de potencia se han estudiado diferentes categorías de impacto al medioambiente y las personas con el fin de recoger la máxima información posible acerca del desempeño ambiental de esta tecnología. Los resultados permiten visibilizar que no todas las categorías de impacto contribuyen de la misma manera al medio, sino que existen algunas más críticas que otras.

Los efectos de las categorías de impacto sobre las personas y el territorio se han analizado de forma conjunta para los tres tipos de tecnología estudiada y ciclos de combustible. Esta aproximación se ha considerado de esta manera ya que el perfil de contribución a cada categoría de impacto es casi idéntico por parte de las tecnologías estudiadas, es decir, las categorías de impacto sobre las que se produce mayor contribución son las mismas en los tres casos. Al tratarse de un análisis de carácter cualitativo, se lleva a cabo una media normalizada de los resultados de los ACV de las tecnologías para analizar los efectos sobre la salud humana y el medioambiente ya que las diferencias de magnitud entre las categorías para cada tecnología no se ven reflejadas en una comparativa de tipo cualitativo.

A continuación, las categorías de impacto se ordenan de forma jerárquica de mayor a menor en cuanto a su contribución en los resultados del ACV de la generación nuclear de potencia. Para

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

poder comparar y evaluar de manera cualitativa la contribución medioambiental de cada categoría de impacto, se ha elaborado la siguiente aproximación: se asigna el valor 1 a la categoría de impacto de mayor incidencia, es decir, disminución de recursos minerales, normalizando así el resto de las categorías. En esta normalización se han tenido en cuenta los resultados obtenidos en el Informe 1 para los tres tipos de tecnologías de generación nucleoelectrica. Es importante destacar que este grado de impacto se ha calculado frente a la categoría de impacto más alta de forma que los resultados aquí presentados son relativos.

En la Tabla 10, se adjuntan las medias normalizadas respecto al valor del impacto sobre el que se produce más contribución. Para poder categorizar las contribuciones de forma cualitativa se ha establecido un parámetro definido como grado de impacto.

Tabla 9. Categorización por colores del grado de impacto

Grado de impacto
ALTO
MODERADO
MEDIO
BAJO

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

Tabla 10. Categorías de impacto en orden de contribución del ACV de la generación de energía nuclear de potencia clasificadas por categoría de daño

Categorías de impacto	Media normalizada	Grado de impacto	Ecosistemas	Salud humana	Recursos
Diminución de recursos minerales	1	ALTO			X
Radiación	0,584	MODERADO		X	
Ecotoxicidad marina	0,481	MODERADO	X		
Toxicidad humana	0,426	MODERADO		X	
Ecotoxicidad del agua	0,380	MODERADO	X		
Transformación de suelo natural	0,230	MEDIO	X		
Formación de partículas	0,058	MEDIO		X	
Acidificación terrestre	0,047	MEDIO	X		
Formación de fotoquímica de ozono	0,040	MEDIO		X	
Disminución de recursos fósiles	0,030	MEDIO			X
Ocupación de terreno urbano	0,029	MEDIO	X		
Eutrofización marina	0,027	MEDIO	X		
Cambio climático	0,013	BAJO	X	X	
Eutrofización del agua	0,009	BAJO	X		
Ecotoxicidad terrestre	0,002	BAJO	X		
Destrucción de la capa de ozono	0,001	BAJO		X	
Ocupación de terreno agrícola	0,001	BAJO	X		
Disminución de recursos hídricos ⁴	0	-	-	-	-

De acuerdo con los parámetros determinados por el método ReCiPe, las categorías de impacto analizadas se pueden asignar a las tres grandes categorías de daño que permiten evaluar el daño a la salud humana, el daño a los ecosistemas y la disminución de recursos. Si bien es cierto que los impactos afectan de manera generalizada a todo el medio, es posible llevar a cabo una

⁴ El método ReCiPe no ofrece valores de normalización para poder comparar con el resto la categoría de impacto de disminución de recursos hídricos

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

priorización de cuál de los tres grandes grupos de las categorías de daño se ve más afectado por un impacto directo y a corto plazo [20].

Las categorías de daño en las que se traducen las categorías de impacto engloban las variables ambientales estudiadas en el apartado anterior de forma que se recogen los efectos de dichas categorías de impacto sobre el medio y la salud humana.

De acuerdo con esta sectorización del efecto de cada categoría de impacto se divide el análisis en dos grandes grupos: Efectos sobre los recursos y los ecosistemas, por un lado, y efectos sobre la salud humana por otro.

4.2.1. Efectos sobre los recursos y los ecosistemas

a. Disminución de recursos minerales

Categoría de impacto ambiental que se refiere al uso de recursos minerales

El agotamiento de los recursos minerales es un concepto que va acompañado de cierto grado de incertidumbre debido a dos factores principalmente que son el desconocimiento del perfil de consumo en el futuro y, por otro lado, el desconocimiento de cuanto mineral queda exactamente en la Tierra. Existen dos alternativas con las que se podría hacer frente a la problemática del agotamiento de los recursos minerales que son el consumo más eficiente de los materiales mediante técnicas de reducción, reutilización y reciclaje y el progreso tecnológico hacia tecnologías que no requieran del uso de dichos minerales o que hagan uso de aquellos que se encuentran en abundancia [21].

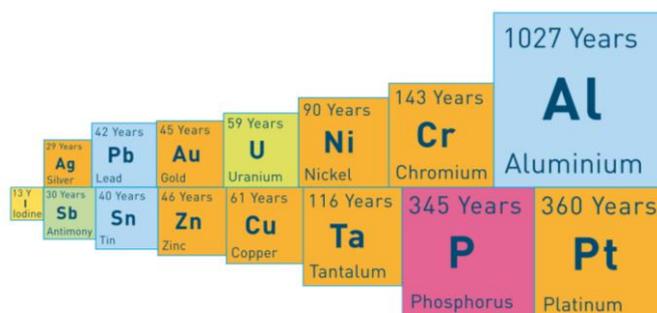


Figura 4-1. Años previstos para cada mineral asumiendo un consumo constante desde 2008 [21]

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

Si bien es cierto que las previsiones del mineral restante en la superficie terrestre no pueden ser precisas debido al desconocimiento de nuevas minas de recursos que pudieran suplir las necesidades en un determinado margen de tiempo.

Las consecuencias del abuso de los recursos minerales pueden afectar a distintas variables ambientales. Las características fisicoquímicas del suelo pueden verse afectadas, así como producirse fenómenos de inestabilidad en el suelo por remociones en masa. Los procesos erosivos, de socavación y pérdidas de suelo son fenómenos intrínsecamente relacionados con la explotación de minas para la extracción de recursos minerales. La degradación de la tierra por la explotación de recursos no renovables puede suponer un daño directo en la biodiversidad de las especies y en los espacios naturales.

Una consecuencia directa de la disminución de los recursos minerales es el agotamiento de una mina en concreto, lo que provocaría la búsqueda de otras localizaciones mineras para explotar con el consecuente aumento del coste del recurso.

Tabla 11. Evaluación del impacto sobre el medio como consecuencia de generación de energía con origen nuclear

Disminución de recursos minerales	
<i>Efecto sobre los recursos y los ecosistemas</i>	<i>Grado</i>
<p>La disminución de recursos minerales en la industria nuclear está relacionada fundamentalmente con la extracción de uranio. Este elemento es la base del combustible nuclear y está presente en la naturaleza en proporciones finitas. De ahí que esta categoría de impacto sea la más penalizante. En un hipotético caso en el que se emplazara una central nuclear en el territorio chileno, el impacto asociado a esta categoría dependería del lugar de la extracción minera, que puede ser o no el propio país. Independientemente de esto, la disminución de recursos minerales afecta a todo el planeta y es un factor inherente a la generación nuclear.</p> <p>Además del uranio, la construcción y puesta en marcha de las centrales precisa de otra serie de recursos minerales fundamentalmente orientada a la extracción de tierras raras.</p>	ALTO

b. Ecotoxicidad del agua (marina y dulce)

Categoría que recoge los impactos tóxicos que afectan a los medios hídricos, nocivos para distintas especies y que cambian la estructura y función del ecosistema.

La ecotoxicidad del agua contabiliza la persistencia medioambiental y el efecto de un químico en el medio acuoso. El agua es un componente vital en el ecosistema global. El agua dulce, concretamente, constituye un hábitat único y esencial para la vida humana.

Los contaminantes que afectan a las aguas proceden, en gran medida, de actividades humanas. Contribuyen significativamente a dicha problemática los vertidos procedentes de las aguas residuales municipales, las escorrentías de agua contaminada, la industria y la agricultura. Una gran proporción de los vertidos a las aguas de superficie proviene de fuentes puntuales fácilmente identificables, como las plantas de tratamiento de aguas residuales o los desagües industriales. La agricultura constituye principal fuente difusa de contaminación de las aguas subterráneas como consecuencia del uso de fertilizantes.

Lleva años siendo objeto de estudio de la contaminación de agua por distintos químicos como los metales pesados y otras sustancias tóxicas, como los plaguicidas y los componentes orgánicos persistentes, así como la contaminación por petróleo. En el caso de los metales pesados tóxicos, el principal agravante es la capacidad que presentan estos de entrar en la cadena trófica y amenazar a especies que formen parte de ella. Otras sustancias tóxicas que pueden llegar a contaminar el medio hídrico son los componentes orgánicos persistentes (COP) los cuales presentan una elevada biodisponibilidad y persistencia medioambiental. Los plaguicidas que llegan al medioambiente acuático pueden afectar a las comunidades biológicas y limitar el uso del agua como agua potable [22].

De manera indirecta, la contaminación del agua no solo supone un riesgo a los ecosistemas, sino que también puede llegar a suponer un riesgo para la salud humana. Los contaminantes, sobre todo de aquellos de tipo persistente, pueden pasar a formar parte de la cadena trófica si se encuentran en medios acuáticos. Como consecuencia de esto, el impacto a la salud humana puede producirse por el consumo de agua contaminada o como ingestión de alimentos que hayan estado en contacto con la misma. Las aguas se ponen en peligro y se contaminan por varias vías y como consecuencia, la salud humana puede verse afectada por una deficiencia en la calidad de las mismas [22].

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

Tabla 12. Evaluación del impacto sobre el medio como consecuencia de generación de energía con origen nuclear

Ecotoxicidad del agua	
<i>Efecto sobre los recursos y los ecosistemas</i>	<i>Grado</i>
<p>Como consecuencia de la operación normal de la planta se generan una serie de residuos químicos y radiactivos que se vierten el medio hídrico. La concentración de estos materiales está controlada y regulada según la normativa vigente de cada país. El modelo de dilución que rige el comportamiento de estos materiales una vez descargados al medio depende del tipo de sistema de refrigeración (mar, río, embalse...). Por ello, a la hora de estudiar el <i>site selection</i> de una posible planta nuclear esta categoría es un criterio para valorar. Por otro lado, recurrir a masas de agua para abastecer las necesidades de refrigeración de las plantas tiene una consecuencia sobre la temperatura del medio acuático. Atendiendo a las características de la hidrología chilena actual, esta Efecto tendría mayores consecuencias en los medios hídricos con peores niveles de calidad, que coincide con las regiones que se encuentran más al norte (la calidad del agua empeora de sur a norte actualmente).</p>	<p>MODERADO</p>

c. Ocupación y transformación del terreno agrícola y urbano

Esta categoría recoge el impacto por el uso (ocupación) de una superficie de suelo por diferentes actividades.

El uso que se le otorga al suelo puede suponer un factor importante en la interacción entre el mismo y la atmósfera. En primer lugar, la temperatura del aire cercana a la superficie terrestre varía en función del uso al que se haya destinado ese terreno. Este fenómeno ha sido observado en terrenos que se han destinado a actividades agrícolas sustituyendo la vegetación original.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

La urbanización del terreno también tiene impactos significativos sobre la temperatura cercana a la superficie terrestre, generándose mayores temperaturas en terrenos urbanizados frente a terrenos rurales.

Por otro lado, el cambio de los usos del suelo actualmente es un factor contribuyente a la concentración de los gases de efecto invernadero. Esta problemática se ve agravada cuando los cambios de uso de suelo se producen por pérdida de suelo forestal [23]. El impacto del cambio de uso del suelo en detrimento de bosques o ecosistemas naturales puede provocar daños en la biodiversidad del entorno, perdiéndose además servicios ecosistémicos.

Tabla 13. Evaluación del impacto sobre el medio como consecuencia de generación de energía con origen nuclear

Ocupación y transformación del terreno	
<i>Efecto sobre los recursos y los ecosistemas</i>	<i>Grado</i>
<p>La ocupación y transformación del terreno es inherente a cualquier actividad. La contribución de esta categoría depende del tipo de actividad. En concreto, en el sector nuclear, el tipo de tecnología (SMR, HWR, PWR...) e incluso el diseño de la planta influye en el grado de impacto en cuanto a ocupación del suelo se refiere. Concretamente, la tecnología del tipo HWR presenta una mayor necesidad de uso del suelo ya que necesita de un terreno adicional para la planta de producción de dicha agua.</p> <p>En cuanto al posible emplazamiento de la planta en el territorio chileno es preferible priorizar zonas libres de bosque nativo o terrenos agropecuarios de explotación actual o posible explotación futura, como puede ser la zona norte. Del mismo modo, es importante tener en consideración las zonas con un grado de erosividad alto con el fin de evitar su agravamiento.</p>	<p>MEDIO</p>

d. Acidificación terrestre

Categoría que recoge los efectos debidos a la presencia de sustancias acidificantes en la superficie terrestre.

La acidificación terrestre tiene un impacto directo sobre el nivel de calidad y disponibilidad de los suelos. Por definición, la acidificación del suelo es la disminución de su pH debido a la acumulación de protones (H⁺) y de aluminio en el suelo y, en consecuencia, la pérdida de cationes básicos como el calcio, magnesio, potasio y sodio debido a la lixiviación [24]. Una de las principales consecuencias de la acidificación de los suelos es la disponibilidad de nutrientes en los mismos ya que está sujeta a variaciones en el pH.

Las principales fuentes de liberación de sustancias que pueden provocar la acidificación de los suelos son la lluvia ácida y el drenaje de sustancias ácidas procedentes de la minería. Si bien es cierto que ciertos ecosistemas pueden transformarse en ácidos debido a causas naturales como la presencia de mayores niveles de materia orgánica o la presencia de vegetación que produzca sustancias ácidas en pantanos [25].

Concretamente, un sector altamente influenciado por la disponibilidad de los suelos es el sector agrícola. La acidificación de los suelos agrícolas suele estar relacionada con el incremento en aportes de nitrógeno y azufre como por ejemplo en los pastos de leguminosas, en el uso de fertilizantes para el tratamiento de los cultivos y por deposición atmosférica (lluvia ácida). Esto es de especial importancia en los suelos más vulnerables que son los que tienen baja capacidad amortiguadora del pH y son aquellos que presentan bajas concentraciones de minerales no resistentes a la intemperie como lo son, por ejemplo, los suelos fuertemente meteorizados y los ricos en cuarzo.

Por otro lado, otra variable ambiental influenciada por las alteraciones del suelo es la flora. Las plantas se ven afectadas cuando el equilibrio químico y biológico del suelo se ve alterado por un aumento en la concentración de protones, es decir, su acidificación. En comparación con el medio acuoso, el suelo tiene una capacidad de neutralizar los cambios en el pH significativamente alta, esto quiere decir que se requiere una elevada cantidad de ácido para alterar el pH. Sin embargo, la reversibilidad del fenómeno es también un proceso complejo. La susceptibilidad de los bosques al fenómeno de la acidificación depende en gran medida de la especie del árbol que predomine, el tipo de suelo, la textura del mismo, la profundidad y el espesor de la capa de humus, entre otros factores.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

De acuerdo con los estudios llevados a cabo por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura sobre el Estado Mundial del Recurso del Suelo, se ha identificado que para América Latina y el Caribe, la acidificación del suelo no supone uno de los principales problemas identificados como prioritarios. Sin embargo, en las zonas en las que se presentan suelos acidificados se debe al uso excesivo de fertilizantes ricos en nitrógeno [24].

Tabla 14. Evaluación del impacto sobre el medio como consecuencia de generación de energía con origen nuclear

Acidificación terrestre	
<i>Efecto sobre los recursos y los ecosistemas</i>	<i>Grado</i>
<p>En algunas fases del ciclo de combustible, principalmente la minería y la molienda, se utilizan compuestos químicos de naturaleza ácida lo cual puede provocar que se produzcan acumulaciones de los mismos en el terreno de la actividad.</p> <p>El estado de la calidad del suelo es primordial a la hora de estudiar el impacto de la acidificación del mismo ya que éste tiene cierta capacidad de neutralización que se pierde si su equilibrio está afectado. Concretamente en el territorio chileno sería conveniente evitar las zonas con elevada actividad industrial y minera por las consecuencias que esto produce en los suelos.</p>	MEDIO

e. Disminución de recursos fósiles

Categoría de impacto ambiental que se refiere al uso de recursos fósiles

El agotamiento gradual de los recursos energéticos fósiles, especialmente de aquellos llamados convencionales o de fácil extracción, es un proceso en marcha ampliamente reconocido. Recientemente la preocupación por el agotamiento de los recursos energéticos y así como de los límites de los ecosistemas para servir de sumidero de los residuos está emergiendo en la escena política y económica. Todos los combustibles fósiles son finitos y no renovables a escala humana y, por ello, limitados desde un punto de vista físico.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

El hecho de que el cenit del petróleo convencional se alcanzó en torno al año 2006 es un dato ampliamente admitido, tanto en círculos científicos como por algunas agencias internacionales. En 2012, el ratio del consumo de petróleo respecto del consumo global cayó a su nivel más bajo de los últimos 50 años. Los descubrimientos anuales de petróleo a nivel mundial alcanzaron su máximo histórico en la década de los años 60. Debido a la similitud entre los pozos de petróleo y gas natural, el comportamiento de los yacimientos de ambos combustibles es muy similar [26].

Por otro lado, el consumo de energía de fuentes fósiles es uno de los principales factores generadores de emisiones de gases de efecto invernadero [27]. Por lo tanto, en consecuencia, el agotamiento de los recursos fósiles acarrea una elevada contribución al cambio climático con todo lo que ello conlleva.

Tabla 15. Evaluación del impacto sobre el medio como consecuencia de generación de energía con origen nuclear

Disminución de recursos fósiles	
<i>Efecto sobre los recursos y los ecosistemas</i>	<i>Grado</i>
<p>La fase que más energía requiere de todo el ciclo de combustible es el enriquecimiento del uranio. Esto lleva asociado unos impactos por el consumo de combustibles fósiles debido al origen de esa energía empleada. En todos los procesos que requieran de un medio de transporte para el abastecimiento o para suministro existe un impacto asociado a la disminución de recursos fósiles.</p> <p>Dado que las distintas fases del ciclo de combustible pueden tener lugar o no dentro del territorio chileno el impacto de esta categoría queda relativizado según la localización de cada una de estas fases.</p>	MEDIO

f. Eutrofización del agua (marina y dulce)

Esta categoría refleja el efecto de los nutrientes a vertidos de agua que aceleran el crecimiento de las algas y demás vegetación en el agua.

Los elementos nutrientes como el fósforo y el nitrógeno pueden convertirse en contaminantes cuando aumenta su proporción en el medio. Este aumento de nutrientes genera un crecimiento descontrolado del fitoplancton. Como consecuencia del aumento de la biomasa del medio acuoso la calidad del agua puede verse afectada, disminuyendo el oxígeno disponible de la misma, llegando a perderse el uso para lo cual estaba destinada. La consecuencia de la eutrofización es una alteración del equilibrio del medio acuoso que desemboca en un deterioro de la calidad del mismo limitando la vida en él.

Uno de los elementos más importantes en la cadena alimenticia del medio acuático que se ve afectado por el fenómeno de la eutrofización es el fitoplancton el cual requiere de nutrientes inorgánicos como nitratos, fosfatos y azufre los cuales convierten en proteínas, grasas y carbohidratos. Cuando estos nutrientes son demasiados en el medio acuático el crecimiento y reproducción del fitoplancton se dispara formando proliferación de algas. Dicha proliferación de algas puede producir efectos dañinos provocando alteraciones en el ecosistema acuático y como consecuencia de esto se produce un aumento en la turbidez del agua lo que provoca que sea menos transparente haciendo que la luz solar no penetre de la manera habitual [23].

En cuanto a las implicaciones directas con el ser humano, destacar que se puede producir el crecimiento de macro algas. La existencia de dichas macro algas puede provocar el acceso limitado o restringido a zonas de baño o recreo. Por otro lado, la eutrofización del agua puede acarrear un sobrecoste económico debido al tratamiento de la misma para destinarlo a usos concretos [28].

En América Latina y más concretamente en el territorio chileno, se tienen datos de las lagunas Acuelo y Torca, las cuales en 2014 presentaron mayores niveles tróficos (hipereutrofia, eutrofización excesiva), mientras que el lago Lanalhue, la Laguna Grande de San Pedro y el lago Vichuquén, presentaron una condición de meso-eutrofia (menores niveles de nutrientes en el medio) [12].

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

Tabla 16. Evaluación del impacto sobre el medio como consecuencia de generación de energía con origen nuclear

Eutrofización del agua	
<i>Efecto sobre los recursos y los ecosistemas</i>	<i>Grado</i>
<p>Durante la minería de uranio se emplean agentes químicos necesarios para extraer y acondicionar el mineral. En la fase de operación se requieren detergentes para la limpieza de los tubos del generador. Estos productos químicos pueden contribuir a la eutrofización del agua por la adición de elementos como fósforo y nitrógeno que actúan de nutrientes en el medio afectando al equilibrio biótico del agua.</p> <p>De acuerdo con los estudios de calidad del agua en Chile, se puede concluir que la calidad de los medios hídricos empeora hacia el norte, siendo un parámetro crítico para evaluar.</p>	<p>MEDIO</p>

g. Cambio climático

Categoría de impacto que refleja el potencial de calentamiento global como la capacidad de un gas de efecto invernadero de influir en el forzamiento radiactivo, expresada en términos de una sustancia de referencia y de un horizonte temporal. Relacionado con la capacidad de influir en los cambios de la temperatura media mundial en la interfaz superficie-aire y en parámetros climáticos y sus efectos.

Una de las principales variables ambientales que se ve afectada por el cambio climático es, precisamente, el clima. Los recientes fenómenos extremos relacionados con el clima, como olas de calor, sequías, inundaciones, ciclones e incendios forestales, ponen en relieve una importante vulnerabilidad y exposición de algunos ecosistemas y muchos sistemas humanos a la actual variabilidad climática. Estos impactos al clima desembocan en alteraciones en los ecosistemas, la desorganización de la producción de alimentos y el suministro de agua, daños a la infraestructura y a los asentamientos, morbilidad y mortalidad, y consecuencias para la salud mental y el bienestar humano [27].

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

La contaminación atmosférica y el cambio climático son fenómenos estrechamente relacionados. Muchos gases responsables del cambio climático también son contaminantes atmosféricos. De manera que la contribución al cambio climático indirectamente también supondría un aumento de la contaminación atmosférica. Recientes estudios indican que esta relación puede ser, de hecho, recíproca y más intensa de lo que se creía hasta la fecha [22].

Respecto al medio biótico, el cambio climático está relacionado con un aumento de la mortalidad de los árboles y de los incendios forestales. Así como la degradación de bosques independientemente del factor de degradación de las tierras o pérdidas de suelo forestal por los cambios de usos del suelo.

Como consecuencia de los efectos que presenta el cambio climático en las diferentes áreas del medioambiente, muchas especies terrestres y dulceacuícolas animales han modificado sus áreas de distribución geográfica y sus actividades estacionales. Además, se ha visto alterada la abundancia de dichas especies en respuesta al cambio climático observado en los últimos decenios, problemática que se está extendiendo a lo largo de muchas regiones.

Trasladando esta información al territorio chileno se pueden describir una serie de fenómenos que afectan a la biodiversidad del país. Se han realizado en Chile distintos estudios de escala nacional para modelar el comportamiento futuro de las especies y los ecosistemas terrestres en Chile frente a escenarios de cambio climático. En relación con la distribución y dispersión de las especies, se señala que las consecuencias de este cambio dependerían fundamentalmente de la capacidad de dispersión o migración a gran escala con que cuenten las especies estudiadas. Considerando que las especies tienen limitaciones para dispersarse cuando cambian las condiciones ambientales en sus áreas tradicionales, la gran mayoría de las especies de flora terrestre y de las especies de fauna que se han analizado presentarían reducciones en su área de distribución proyectada. Por su parte, los humedales alto-andinos, ubicados en el extremo norte del país, experimentarían una reducción producto de la tendencia a la disminución del agua de las precipitaciones y consecuentemente de recarga de acuíferos, caudales y escorrentía superficial, siendo estos acuíferos los principales sostenedores de los humedales de esta zona, lo que significaría un perjuicio en la estabilidad y funcionalidad ecológica de estos ecosistemas. Para el año 2050, los ecosistemas más vulnerables serían los ubicados entre la Región de Coquimbo y la Región de Los Lagos. Entre ellos, los más vulnerables serían algunas zonas de vegetación. Pese a que el territorio chileno posee condiciones particularmente favorables para atenuar la magnitud de los cambios en las temperaturas, no sucede lo mismo ante variaciones en precipitaciones amenazando seriamente a los recursos hídricos y a la vegetación natural, la cual debería adaptarse en una importante extensión del territorio a una condición algo más árida.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

La región central mediterránea del país podría ser la más afectada por la disminución de las precipitaciones, para cuya zona se ha indicado como probable, para el año 2040, una reducción superior a 30% en el promedio anual de las precipitaciones. En las regiones altas, por su parte, sobre los 2.000 m, sentiría con fuerza el aumento de la temperatura, lo cual haría que los ecosistemas de altura requieran particular atención, no sólo por la amenaza climática, sino porque cumplen un importante rol regulador hídrico en las partes altas de las cuencas. En ambientes marinos, para Chile se pronostican aumentos del nivel medio del mar al año 2100, del orden de los 20 cm, entre los 30°C y 60°C y de 25 cm, entre los 20°C y 30°C. Sumado a lo anteriormente señalado, se pronostica la posibilidad de que aumenten eventos con repercusiones en la fauna costera y marina, así como cambios en la temperatura y salinidad donde se concentran cultivos marinos, lo cual podría causar la diseminación de enfermedades [17].

Tabla 17. Evaluación del impacto sobre el medio como consecuencia de generación de energía con origen nuclear

Cambio climático	
<i>Efecto sobre los recursos y los ecosistemas</i>	<i>Grado</i>
<p>De la misma manera que la categoría de impacto de disminución de recursos fósiles, el cambio climático se encuentra asociado a los procesos de transporte y de consumos de energía de fuentes fósiles. En el sector nuclear, la mayor contribución al cambio climático se limita a los procesos en los que se requieran combustibles como el transporte de suministros, maquinaria para la minería y molienda, etc.</p> <p>El cambio climático se trata de una problemática ambiental a escala global que no es posible particularizar a una localización concreta.</p>	BAJO

h. Ecotoxicidad terrestre

Categoría que recoge los impactos tóxicos que afectan a la superficie terrestre, nocivos para distintas especies y que cambian la estructura y función del ecosistema.

La calidad del suelo se ve directamente afectada por esta categoría de impacto ya que, a pesar de tratarse de un recurso renovable, los procesos de recuperación tras una alteración en su equilibrio pueden tardar años en sucederse.

La contaminación de los suelos puede tener consecuencias en los cursos subterráneos de agua, ya que los contaminantes presentes en el mismo pueden ser solubles en agua y producirse mecanismos de intercambio entre agua y suelo. Los agentes contaminantes del suelo que presentan una mayor movilidad son los hidrocarburos clorados y productos de petróleo. Por el contrario, los metales pesados presentan una movilidad menor sin embargo puede verse aumentada en función de las condiciones del suelo, por ejemplo, la movilidad del plomo se ve incrementada en medios ácidos. Por este motivo, la acidificación de los suelos se encuentra relacionada con la ecotoxicidad.

Los efectos sobre la flora por la ecotoxicidad terrestre pueden sucederse ya que las plantas pueden absorber, a través del mismo mecanismo para los nutrientes, los contaminantes que se encuentren presentes en el suelo. En el caso de los metales pesados, estos materiales pueden llegar acumularse en cantidades elevadas en las plantas, como es el caso del cadmio y el cobre.

La contaminación de las aguas superficiales puede conducir a la acumulación de contaminantes en los peces. Los compuestos orgánicos clorados, del mismo modo que ciertos metales como el mercurio, se incorporan con bastante facilidad en los tejidos grasos de los peces.

Por último, el sector agropecuario se puede ver afectado por el hecho de que se limite la cantidad de suelos no contaminados para el inicio de labores agrícolas [22].

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

Tabla 18. Evaluación del impacto sobre el medio como consecuencia de generación de energía con origen nuclear

Ecotoxicidad terrestre	
<i>Efecto sobre los recursos y los ecosistemas</i>	<i>Grado</i>
<p>Durante los procesos de fabricación del combustible se emplean productos de diferente naturaleza química que pueden llegar a suponer un riesgo al medio. Sin embargo, estos son principalmente de naturaleza ácida durante los procesos de minería que contribuyen en mayor medida a la acidificación terrestre.</p> <p>De la misma manera que la acidificación terrestre la contribución al territorio chileno de esta categoría dependerá del estado del suelo en el que se produzca la contaminación. Si bien es cierto, que la zona norte presenta un mayor número de actividades industriales y mineras que contribuyen a la contaminación del suelo, la degradación del mismo en el territorio se da principalmente por la erosión. Es por esto por lo que se deberían evitar zonas industriales que contribuyan a una contaminación del suelo.</p>	BAJO

4.2.2.Efectos sobre la salud humana

a. Radiación

Esta categoría hace referencia a los efectos nocivos sobre la salud humana debido a sustancias radiactivas.

Aunque las centrales nucleares no emiten cenizas volátiles nocivas o gases de efecto invernadero como lo hacen las plantas basadas en combustibles fósiles, la radiactividad liberada ha sido el principal foco de la preocupación pública en relación al uso de la energía nuclear, a pesar de las estrictas medidas de control y precauciones adoptadas por la industria. Ha habido muchos intentos de establecer niveles aceptables de radioactividad en el medioambiente o en el hombre y, aunque las recomendaciones de la ICRP (*International Commission on Radiation Protection*) son generalmente aceptadas para evaluar los riesgos ocupacionales, la extensión del

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

posible efecto de las radiaciones ionizantes a grandes poblaciones y el medioambiente en su conjunto ha sido objeto de preocupación colectiva [29].

La producción de energía nucleoelectrónica lleva asociada la emisión controlada de efluentes radiactivos en fase líquida y gaseosa durante la fase de operación y la liberación de algunos materiales radiactivos en otras fases del ciclo nuclear. A continuación, se analizan algunas de estas fases indicando los principales impactos de la radiación sobre las personas y el medioambiente. Estos impactos, en muchas ocasiones, son mínimos y muy difíciles de cuantificar gracias al control exhaustivo que corre a cargo de las autoridades competentes y del propio explotador de la planta.

Fase de minería y molienda

En la fase de minería, los impactos ambientales asociados con la extracción de uranio se pueden clasificar en efectos sobre la tierra y el agua a través del desecho de aguas residuales derivadas del drenaje de la mina y/o del agua utilizado en la perforación. Por otro lado, los efectos sobre la salud humana se asocian a riesgos ocupacionales debido al Radón producido por el decaimiento de Ra-226 que se encuentra en los minerales. Se han realizado estudios epidemiológicos evaluando si este efecto supone un factor importante en el aumento de la incidencia de cáncer entre los mineros de uranio [30]. La exposición de estos trabajadores se controla a través de la ventilación natural o artificial y se mantiene dentro de los límites permisibles de concentración de radón. También es necesario realizar un control del polvo generado en los procesos de minería para evitar la exposición a niveles peligrosos de sílice y radiación.

En el proceso de molienda, aproximadamente el 70% de la radiactividad contenida en el mineral permanece sin disolverse en las colas de uranio. Los efectos ambientales de las colas incluyen: erosión en áreas no restringidas, contaminación de ríos o riberas de los ríos, lixiviación de radio del material por procesos de subida del nivel del agua y la filtración de agua a través las colas que va a parar a en agua subterránea. Las colas de deben aislarse de la erosión del viento y el agua durante períodos muy largos (dictados por la vida media del isótopo) alcanzando los 1620 años para Ra-226.

Cabe señalar que los impactos ambientales y los riesgos ocupacionales asociados a la minería del carbón (para operar una planta de 1000 MWe), tienden a ser más significativos que los relacionados con la extracción de uranio (para operar una planta con la misma capacidad). El número de 'muertes ambientales' entre los mineros del carbón es mucho más alta que en el caso de mineros en la industria del uranio.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

Fabricación del combustible

El principal peligro potencial en el proceso de fabricación de combustible proviene de la toxicidad de fluoruro de hidrógeno y flúor utilizados en la producción de hexafluoruro de uranio. Sin embargo, este riesgo no es de carácter radiológico. A medida que aumenta el nivel de enriquecimiento de uranio, también aumenta el riesgo de acumulación accidental de cantidades suficientes de U-235 generando una masa crítica que puede activar una reacción en cadena. Aunque los accidentes de criticidad son muy poco probables, se necesita un importante control que garantice que tales eventos nunca ocurran. Los residuos de uranio empobrecido en las plantas de enriquecimiento normalmente se almacenan para un posible uso futuro como un componente fértil del combustible del reactor. Este material es levemente radioactivo y puede producir nucleídos más peligrosos como Ra-226 y Rn-222. La producción de estos nucleídos es, sin embargo, muy lenta y cualquier riesgo de radiación de las reservas se controla limitando acceso a la zona.

La producción de elementos combustibles de dióxido de uranio es un procedimiento bien establecido que, a priori, está libre de peligros apreciables. La fabricación de combustible basado en óxidos mixtos es mucho más compleja. Los riesgos surgen de la toxicidad del plutonio y del hecho que la masa crítica de dióxido de plutonio en la que pueden comenzar las reacciones de fisión de la cadena es solo unos pocos kilogramos. Sin embargo, los riesgos operacionales normales de la producción de combustible de óxido mixto no son difíciles de administrar.

Operación del reactor

Durante la operación normal de un reactor nuclear se generan productos de fisión y activación de distinta naturaleza (algunos de ellos volátiles) que, según el estado físico en el que se encuentran, se clasifican en efluentes líquidos o gaseosos. Estos efluentes sufren distintos procesos de filtrado a través de los sistemas de planta y, posteriormente, son liberados al exterior. Como se describió en el Informe 1 (Tablas 2 y 3), atendiendo a su naturaleza, los efluentes líquidos y gaseosos se pueden clasificar en: gases nobles, halógenos, partículas y tritio.

Durante la fase de operación, también se genera material radiactivo sólido cuyo riesgo asociado a la radiación queda limitado a los trabajadores expuestos que desarrollan su labor profesional en la central nuclear. Estos residuos sólidos son gestionados desde planta minimizando la exposición de los trabajadores y limitando el riesgo sobre el público y el medioambiente ya que, a diferencia de los efluentes líquidos y gaseosos, los materiales sólidos radiactivos no se liberan al medio. Estos materiales radiactivos sólidos pasan a considerarse residuos que, según su

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

actividad, se clasificarán y gestionarán de diferente manera en la fase de operación o, en última instancia, en la etapa desmantelamiento.

Los productos de fisión son, en su mayor parte, retenidos dentro del combustible. No obstante, tanto los productos de fisión que escapan de la matriz del combustible como aquellos productos radiactivos que se forman en el seno del refrigerante como consecuencia de procesos de activación se filtran a través de los sistemas de procesamiento de residuos líquidos y gaseosos de los que disponen todas las plantas. De esta manera, los efluentes radiactivos líquidos y gaseosos sufren procesos de filtrado a través de dichos sistemas previamente a su descarga. El proceso de filtrado garantiza que las dosis recibidas por la población y el medioambiente como consecuencia de la operación normal de la instalación sean inferiores a los límites legales (en el caso de España, 1 mSv/año para el público en general [31]). Además, el objetivo de toda planta es que sus emisiones no supongan una contribución a la dosis mayor que la dosis recibida a causa de la radiación natural. Por ello, como método adicional a los límites legales, las plantas toman medidas particulares para restringir la dosis al público como consecuencia de su operación normal estableciendo límites administrativos propios de cada central nuclear (como, por ejemplo, 0,1 mSv/año [32]).

Para ilustrar el impacto de las emisiones controladas durante la operación normal, en la Figura 4-2 se muestra un gráfico con la evolución de la dosis efectiva anual en las poblaciones más significativas (por número de habitantes y cercanía) en un entorno de 30 km alrededor del emplazamiento de la Central Nuclear de Almaraz (España), central tipo PWR con dos unidades que producen 1055,4 MWe, cada una.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

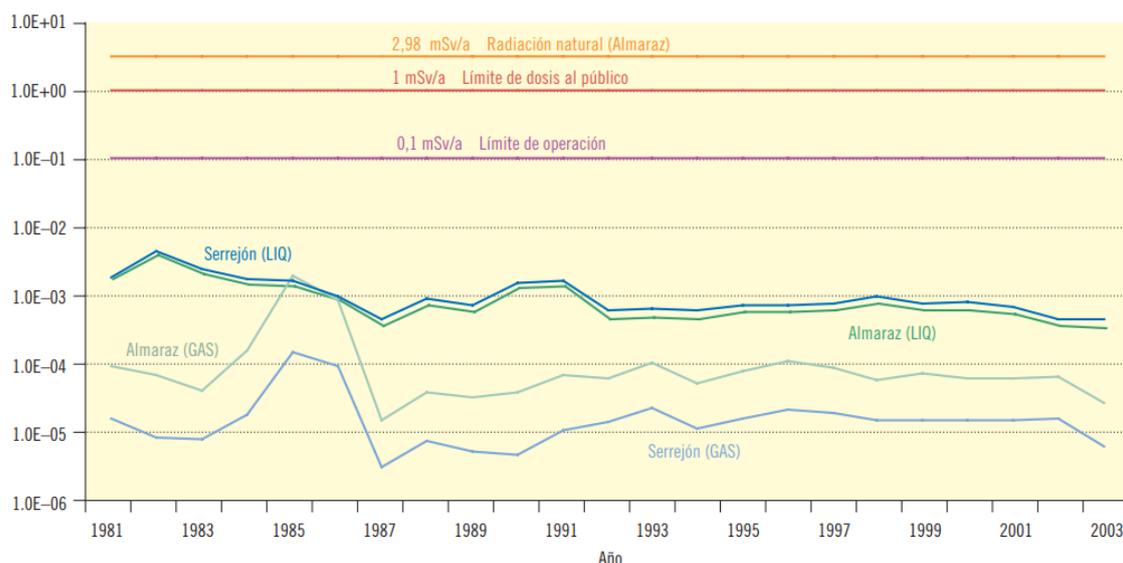


Figura 4-2. Evolución de la dosis debida a efluentes líquidos y efluentes gaseosos en la Central Nuclear de Almaraz en los municipios más significativos. Comparativa con los límites de dosis administrativos y legales y con los niveles de radiación natural en las inmediaciones del emplazamiento.

Como se puede ver en la figura anterior, la dosis en las poblaciones más significativas dentro del entorno de la central son dos órdenes de magnitud menores que el límite de operación establecido administrativamente por la planta y tres órdenes de magnitud menores al límite legal establecido en España y a la radiación natural de fondo. En particular, la dosis anual que recibiría un habitante del municipio de Serrejón (a 9,1 km de la central) como consecuencia de la operación de la Central Nuclear de Almaraz supone un 0,18% de la dosis recibida por radiación natural.

Numerosos estudios epidemiológicos están enfocados en el estudio de los efectos de estas dosis sobre la población y el entorno. En el caso de España, el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) ha elaborado un documento titulado *Estimación de las dosis a la población por la exposición debida al funcionamiento de las instalaciones nucleares y radiactivas del ciclo de combustible, y a la radiación natural* [32]. En este estudio se llega a una serie de conclusiones acerca del impacto de las radiaciones ionizantes sobre las personas y el medioambiente que a continuación se resumen:

- El mejor método para evaluar la dosis recibida por los miembros del público consiste en cuantificar su valor a través de la magnitud Dosis Efectiva. En un principio, algunos organismos como la ICRP no recomiendan emplear esta magnitud cuando se intenta establecer una relación causa-efecto sobre los daños a la salud sufridos por los

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

individuos. Sin embargo, puede ser aceptable su utilización cuando se trate de estudios exploratorios de tipo ecológico y siempre que las dosis así obtenidas se mantengan suficientemente bajas.

- Los valores de dosis a los miembros del público por efecto de la operación de las instalaciones nucleares españolas se encuentran muy por debajo de los valores establecidos en la regulación (límite anual, restricción operacional de dosis), de forma que se asegura su cumplimiento en todo momento.
- La principal exposición del público a la radiación artificial suele transmitirse en las vías asociadas a efluentes líquidos pues los mapas de distribución de dosis muestran en general patrones más afectados río abajo de las instalaciones. No obstante, este resultado puede venir condicionado por los conservadurismos introducidos en las hipótesis de dilución del vertido corriente abajo.
- Entre los distintos municipios estudiados en el entorno de cada uno de los emplazamientos, se observa una gran variabilidad en los valores de dosis por efecto de las instalaciones, dependiendo de las actividades anuales vertidas (que pueden presentar fuertes variaciones a lo largo del tiempo) y las direcciones preferentes de los agentes de transporte (ríos, corrientes, vientos predominantes). Así se observan variaciones de hasta seis órdenes de magnitud entre el municipio con dosis anual máxima y el de dosis anual mínima.
- Comparando las diferentes instalaciones, se observa también una gran dispersión en los valores de los niveles de exposición.
- Por el contrario, los mapas de dosis por radiación natural muestran un patrón mucho más uniforme, tanto entre emplazamientos como en torno a cada uno de ellos, incluyendo los entornos peninsulares de referencia.
- En todo caso, los valores de dosis por radiación artificial se encuentran varios órdenes de magnitud por debajo del nivel de radiación natural anual, por lo que su contribución a la dosis total recibida por los individuos es muy baja.

Según lo anterior, los efectos adversos de la radiación sobre las personas y el medio debido a la operación normal en centrales nucleares durante la fase de operación son limitados. Para contextualizar esta dosis y compararla con otras actividades humanas que conllevan exposición a radiaciones ionizantes, en la Figura 4-3 se muestra una comparativa de las dosis recibidas en distintos ámbitos del sector nuclear.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

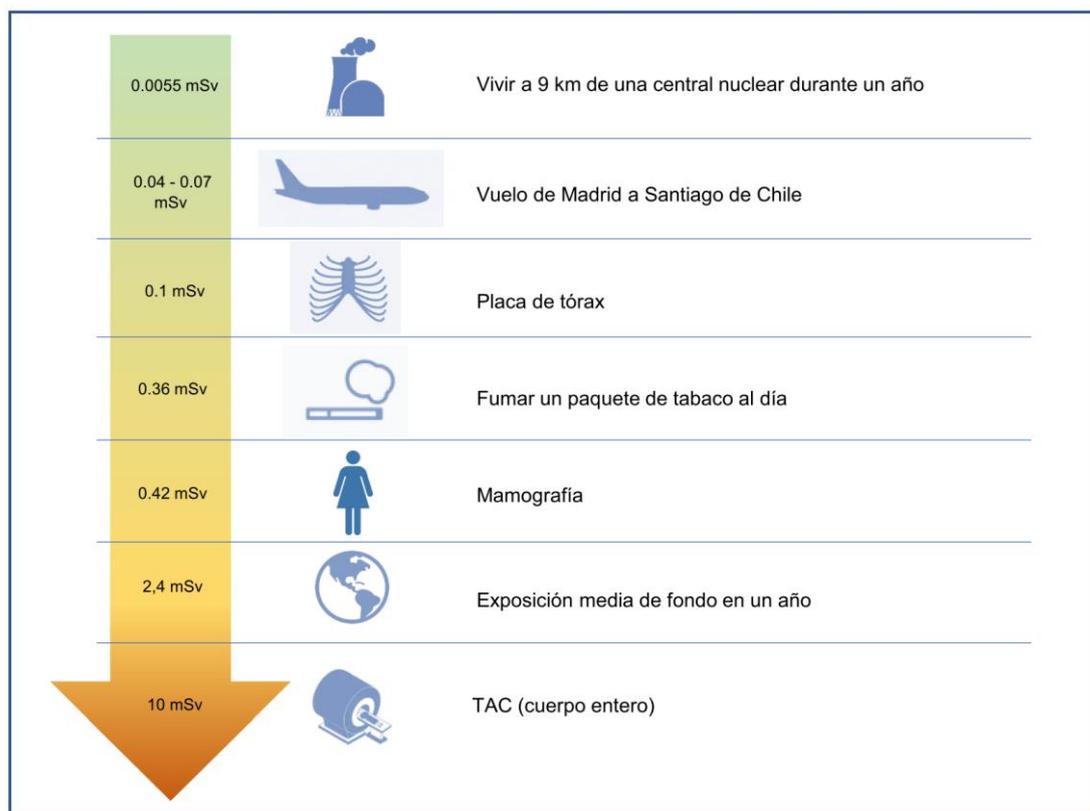


Figura 4-3. Comparativa de dosis de radiación debida a causas artificiales o antropogénicas [33] [34] [35].

No obstante, en escenario de accidente la liberación de material radiactivo puede comprometer seriamente la salud humana y el ecosistema [36].

Desmantelamiento

La fase de desmantelamiento de una central nuclear puede traer consigo ciertas implicaciones radiológicas.

En el inicio de la fase de desmantelamiento el 99% de la radiactividad inicial se evacúa con la retirada del combustible. El resto de radiactividad es debida a las estructuras y componentes que quedan activados tras los ciclos de operación junto con la contaminación superficial remanente en paramentos. La naturaleza de estos materiales permite clasificarlos como residuos radiactivos sólidos.

En cuando a los residuos líquidos y gaseosos, las cantidades son muy inferiores con respecto a los generados durante la operación normal de la planta. En la fase de desmantelamiento, desaparecen gases nobles y halógenos y se hacen más importantes algunos isótopos como el

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

Co-60, el Fe-55 y el Ni-63 que son, fundamentalmente, productos de activación. Durante la fase de desmantelamiento, algunos sistemas de planta siguen operando con el fin de llevar a cabo sucesivos procesos de filtrado antes del descargo de sistemas. La radiactividad presente en estos fluidos queda retenida en los filtros, resinas y lodos que, posteriormente, se gestionan convenientemente como residuos radiactivos sólidos. Tras el filtrado, un volumen de esta agua filtrada se emplea en distintas tareas de desmantelamiento como, por ejemplo, el corte bajo agua de componentes o procesos de cementación de residuos sólidos de media y baja actividad.

El efecto de la radiación sobre las personas queda restringido al personal profesionalmente expuesto que, trabajando en planta, tenga que desempeñar labores que impliquen una exposición a los materiales radiactivos anteriormente descritos.

Reprocesado del combustible

Los elementos de combustible gastado que se retiran del núcleo de reactor constituyen la fuente de radiación con más actividad de todo el ciclo nuclear. El principal peligro es la enorme cantidad de radiación gamma emitida por el decaimiento de los productos de fisión.

En una planta de reprocesado de combustible, los elementos combustibles se disuelven químicamente a través de distintos procesos. En primer lugar, se produce el troceado y disolución en ácido nítrico del combustible gastado para separar el uranio y el plutonio de los productos de fisión. A continuación, se utiliza un éster de ácido fosfórico como disolvente orgánico que permite extraer el uranio y el plutonio. Finalmente, se separa el uranio del plutonio por medio de un reductor químico. Todo ello permite recuperar el combustible gastado y utilizarlo en futuros ciclos. Durante este proceso, la mayor parte de los productos de fisión, además de los productos radiactivos inducidos por activación en los materiales estructurales del combustible, se convierten en sólidos y líquidos. Hasta el momento, las plantas de reprocesamiento de combustible han sido consideradas junto con la minería la fuente principal de contaminación ambiental relativa a la industria nuclear.

Los productos de fisión gaseosos contenidos en los elementos combustibles, en particular Kr-85 y Y-129, son liberados de los gránulos de combustible durante el reprocesamiento. El tritio y los compuestos volátiles de C-14 también son liberados. Existe nuevamente un control sobre estos gases y sus emisiones a la atmósfera.

Los desechos líquidos de baja actividad que surgen durante el reprocesado se descargan de manera eventual al medioambiente. Generalmente, la mayor parte de esos efluentes contienen una pequeña cantidad de tritio.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

Tabla 19. Evaluación del impacto sobre el medio como consecuencia de generación de energía con origen nuclear

Radiación	
<i>Efectos sobre la salud humana</i>	<i>Grado</i>
<p>La radiación es uno de los principales impactos de la industria nuclear sobre el medio y las personas. En operación normal, su origen proviene de las emisiones controladas de efluentes líquidos y gaseosos. Durante otras fases de la vida de la central como el desmantelamiento los materiales radiactivos proceden de los residuos y de los productos de activación en estructuras y sistemas. En el caso del ciclo de combustible, los materiales radiactivos provienen del propio mineral de uranio y su posterior transformación.</p> <p>De cara a minimizar el impacto de esta categoría en un posible emplazamiento futuro en el territorio chileno, el <i>site selection</i> ha de contemplar localizaciones lejanas a núcleos urbanos y puntos de gran afluencia de personas como lugares de interés turístico o áreas recreativas. No obstante, como se ha detallado anteriormente, las emisiones de radiación en todo el proceso nuclear son controladas y se encuentran restringidas bajo unos umbrales de dosis y concentración.</p>	<p>MODERADO</p>

b. Toxicidad humana

Categoría de impacto que recoge los efectos nocivos sobre la salud humana debidos a la absorción de sustancias tóxicas mediante la inhalación de aire, la ingesta de alimentos o agua, o la penetración a través de la piel.

Según datos publicados por las Naciones Unidas por el Medioambiente [37], actualmente la contaminación se encuentra entre los factores que causan más muertes al año a lo largo de todo el mundo. Se conoce que las sustancias capaces de afectar a la salud humana son muy numerosas por lo que es necesario acotar a un listado determinado para poder contabilizar esta categoría. Las sustancias que se tienen en cuenta son COVNM (compuestos orgánicos volátiles no metánicos), metales pesados, óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre, COV, compuestos orgánicos clorados, contaminantes orgánicos persistentes y materia particulada.

Algunas de las sustancias citadas son las causantes de la contaminación atmosférica, por lo que se puede determinar que esta tiene efectos negativos sobre la salud. Son muchos los efectos a corto y a largo plazo que la contaminación atmosférica puede ejercer sobre la salud de las personas. De hecho, aumenta el riesgo de padecer enfermedades respiratorias agudas, como la neumonía, y crónicas, como el cáncer del pulmón y las enfermedades cardiovasculares. Si bien es cierto que la contaminación atmosférica afecta de distintas formas a diferentes grupos de personas. Los efectos más graves se producen en los grupos de riesgo, como lo son aquellas personas que ya padecen alguna enfermedad. Además, los grupos más vulnerables, como los niños, los ancianos y las familias de pocos ingresos y con un acceso limitado a la asistencia médica son más susceptibles a los efectos nocivos de dicho fenómeno.

Se calcula que en el mundo suman 1,3 millones las personas que mueren en un año a causa de la contaminación atmosférica urbana; más de la mitad de esas defunciones ocurren en los países en desarrollo. Los residentes de las ciudades donde hay niveles elevados de contaminación atmosférica padecen más enfermedades cardíacas, problemas respiratorios y cánceres de pulmón que quienes viven en zonas urbanas donde el aire es más limpio.

La exposición a corto y a largo plazo produce efectos sobre la salud. Por ejemplo, las personas aquejadas de asma afrontan un riesgo mayor de sufrir una crisis asmática los días en que las concentraciones de ozono a nivel del suelo son más elevadas, mientras que las personas expuestas durante varios años a concentraciones elevadas de material particulado tienen un riesgo mayor de padecer enfermedades cardiovasculares [38].

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

Tabla 20. Evaluación del impacto sobre el medio como consecuencia de generación de energía con origen nuclear

Toxicidad humana	
<i>Efecto sobre la salud humana</i>	<i>Grado</i>
<p>Los efluentes líquidos y gaseosos de naturaleza radiactiva o productos químicos de desecho que se liberan en la operación normal de la planta pueden llegar a afectar a la salud humana a través de vías directas (inhalación o irradiación) o indirectas (ingestión) a través de medios contaminados.</p> <p>Este impacto sobre el territorio chileno dependerá de la cercanía a núcleos poblacionales y núcleos de actividades recreativas. Además, es importante considerar si el emplazamiento de las actividades es foco de migraciones estivales o periodos de recreo vacacional. En el caso del territorio chileno el objetivo se pondría en zonas poco densas en población y alejadas de los núcleos haciendo que este impacto se vea mitigado en cierta medida.</p>	<p>MODERADO</p>

c. Formación de partículas

Corresponde a los efectos nocivos sobre la salud humana debidos a las emisiones de partículas y sus precursores (NO_x, SO_x, NH₃). Pequeñas partículas con menos de 10 micras de diámetro.

El material particulado tiene impactos sobre la salud humana, el clima, la visibilidad, y los ciclos biogeoquímicos.

En primer lugar, la relación presente entre la salud humana y la presencia de partículas en la atmósfera determina que la inhalación y deposición de estas partículas en los pulmones puede provocar o acelerar enfermedades cardiovasculares. Aquellas partículas las cuales son lo suficientemente pequeñas como para atravesar el tejido es posible que alcancen el torrente sanguíneo y sean transportadas a lo largo del cuerpo. Es complicado actualmente asociar alteraciones en la salud humana con la incidencia de estas partículas debido a que la mezcla de estos componentes suele ser muy variable [39].

Por otro lado, la formación de partículas puede tener efectos directos e indirectos sobre el clima, ya que pueden provocar alteraciones del balance de radiación global a través del rebote y absorción de la misma por las partículas. Estas también pueden llegar a influir en la formación y tiempo de vida de las nubes en la troposfera actuando de núcleos para los mecanismos de solidificación del agua. También existe una relación entre las partículas del medio y el suelo. Esto es debido a la suspensión, transporte, deposición y resuspensión de las partículas que pueden proveer al medio de un mecanismo de transporte de materia entre los diferentes sistemas. Concretamente, las partículas, en el ciclo del nitrógeno del suelo, son un elemento imprescindible para que esto suceda haciendo que se encuentren estrechamente relacionados los procesos del suelo con la presencia de partículas en el medio.

La contaminación atmosférica es debida, en parte, por la presencia de partículas en la atmósfera. Estas partículas pueden presentarse en infinidad de formas y tamaños, además de estar compuestas por diferentes químicos. El rango tan amplio que presentan en cuanto a morfología y composición supone que se den lugar a reacciones químicas en la atmósfera con contaminantes químicos como dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno contribuyendo a dicha problemática.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

Tabla 21. Evaluación del impacto sobre el medio como consecuencia de generación de energía con origen nuclear

Formación de partículas	
<i>Efecto sobre la salud humana</i>	<i>Grado</i>
<p>La mayor parte de las partículas generadas en la industria nuclear se produce en determinadas fases iniciales del ciclo de combustible como son la minería y la molienda, la conversión y el enriquecimiento. También es posible que durante la fase de construcción de la planta se generen cantidades significativas de partículas. Por otro lado, los consumos de combustibles fósiles asociado a los procesos de transporte también contribuyen a la formación de partículas.</p> <p>El impacto de la formación de partículas en el territorio chileno agravaría en las zonas con concentración alta por la presencia de otras industrias o minerías emisoras de partículas. Por lo tanto, una buena práctica para limitar el agravamiento de los impactos de la formación de partículas es evitar zonas de saturación del aire por estos elementos además de zonas de elevada densidad poblacional, para evitar saturaciones y efectos sobre las personas.</p>	<p>MEDIO</p>

d. Formación fotoquímica de ozono

La formación de ozono a nivel del suelo de la troposfera, debida a la oxidación fotoquímica de compuestos orgánicos volátiles y de monóxido de carbono en presencia de óxidos de nitrógeno y luz solar.

La formación fotoquímica del ozono se produce mediante un proceso de reacciones en cadena en la troposfera a partir de contaminantes primarios como los óxidos de nitrógeno y los compuestos orgánicos volátiles. Estas reacciones se ven catalizadas por la luz solar y dan lugar al smog fotoquímico, conjunto de contaminantes secundarios entre los que se encuentra el ozono. El contaminante secundario más relevante en este caso es el ozono ya que es el que se produce en mayores cantidades y presenta un elevado grado de toxicidad.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

Este contaminante es capaz de provocar daños en diferentes variables ambientales. En primer lugar se describen los efectos sobre las personas, las principales consecuencias de la exposición al ozono son las dificultades respiratorias en la población que presente algún factor de riesgo. Entre los efectos en seres humanos figuran una reducción de la función pulmonar y una mayor incidencia de síntomas respiratorios y reacciones inflamatorias en el pulmón [22].

Por otro lado, se describen los daños provocados en la flora de forma indirecta. Estos daños en la vegetación por el ozono aparecen como lesiones foliares, reducciones de la cosecha y de la producción de semilla. Varios estudios han demostrado que las plantas sufren alteraciones cuando la exposición a ozono supera determinado nivel que varía dependiendo de las especies. La reducción del crecimiento de la vegetación y de las cosechas como consecuencia del ozono se asocian sobre todo con la exposición a largo plazo, aunque la sensibilidad de las plantas a los daños depende de diversos factores climáticos. Los efectos en plantas y cosechas no siempre se reconocen, ya que pueden atribuirse, por ejemplo, a episodios meteorológicos como las heladas. Los efectos sobre la vegetación pueden quedar enmascarados e incluso reducirse por las sequías.

El Centro Nacional del Medioambiente de la Universidad de Chile dio a conocer los principales resultados obtenidos en un estudio sobre la contaminación fotoquímica que afecta a los valles centrales del país en el año 2010. En estos resultados se concluyó que, a pesar de la disminución de los niveles de contaminantes, en más de un tercio de los días de verano se superó la norma de calidad de (61 ppb). El estudio arrojó como principal conclusión que el valle de Santiago ha registrado en los meses de verano (diciembre, enero y febrero), un gran número de días con alta contaminación. La investigación también detalló que en localidades como Colina y Los Andes también se presentan días de superación de la norma, mientras que en Rancagua la situación es de latencia, lo que indicaría que la contaminación fotoquímica se extiende sobre una amplia superficie geográfica [40]. En la Figura 4-4 publicada en el Tercer Reporte del Estado del Medioambiente en Chile, se representan los niveles de ozono por años y el nivel fijado por la norma. Como se puede apreciar los niveles de concentración superan los de la norma en todos los años observándose una tendencia a la baja desde 2005 hasta 2016.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

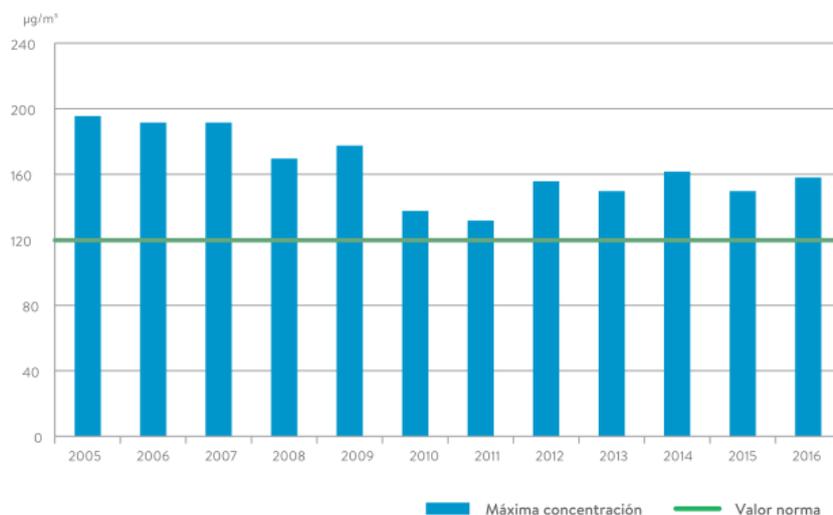


Figura 4-4. Concentración de ozono por años y nivel fijado por la norma

Tabla 22. Evaluación del impacto sobre el medio como consecuencia de generación de energía con origen nuclear

Formación fotoquímica de ozono	
Efecto sobre la salud humana	Grado
<p>Los procesos relacionados con la fabricación del combustible tienen asociado emisiones de contaminantes primarios que pueden dar lugar a ozono por la acción de la radiación. Estos contaminantes están relacionados indirectamente con los consumos energéticos que requieran de fuentes fósiles, concretamente, la fase del enriquecimiento supone un consumo energético muy elevado contribuyendo al consumo de dichos combustibles.</p> <p>En el territorio chileno se ha llevado a cabo estudios que ponen en relieve en algunos puntos la elevada concentración de ozono llegando a superar (como en el valle de Santiago) los niveles fijados por la norma. Evitar emplazar las actividades emisoras en zonas con concentraciones elevadas en ozono es una buena práctica de cara a no agravar esta problemática.</p>	MEDIO

e. Cambio climático

Categoría de impacto que refleja el potencial de calentamiento global como la capacidad de un gas de efecto invernadero de influir en el forzamiento radiactivo, expresada en términos de una sustancia de referencia y de un horizonte temporal. Relacionado con la capacidad de influir en los cambios de la temperatura media mundial en la interfaz superficie-aire y en parámetros climáticos y sus efectos.

Los hábitos de la población pueden verse afectados por los efectos del cambio climático. Una de las principales consecuencias en la población es un aumento en la mortalidad a causa del calor y una disminución asociada al frío en algunas regiones. Los cambios locales en la temperatura y la precipitación han alterado la distribución de algunas enfermedades transmitidas por el agua y vectores de enfermedades. Esto se debe a que la salud de las poblaciones es sensible a patrones meteorológicos y otros aspectos del cambio climático. Estos efectos son consecuencia de cambios en la temperatura, precipitaciones, sequías, inundaciones, etc. Los episodios meteorológicos extremos no solo tienen consecuencias en la distribución de algunas enfermedades, sino que también provocan desplazamientos temporales o permanentes de población a consecuencia de daños provocados a las infraestructuras [27].

Las consecuencias del cambio climático pueden afectar gravemente a los sectores que más están en contacto con el medioambiente o que directamente dependen de él. Concretamente, el sector agropecuario se encuentra altamente influenciado por la acción del clima y sus consecuencias recaen directamente en la producción de alimentos y medios de subsistencia a lo largo de todo el mundo. Las variaciones en las precipitaciones constituyen un factor determinante en la producción de las cosechas haciendo que los rendimientos de las mismas se estanquen o se reduzcan a pesar de la mejora de la tecnología.

En la productividad pesquera también se ven reducciones como consecuencia de los cambios provocados en los medios acuáticos producidos por efecto del cambio climático.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

Tabla 23. Evaluación del impacto sobre el medio como consecuencia de generación de energía con origen nuclear

Cambio climático	
<i>Efecto sobre la salud humana</i>	<i>Grado</i>
La contribución al cambio climático en el sector nuclear se limita al uso de combustibles para maquinaria, minería, molienda, etc. Al tratarse de consumos puntuales y no en operación habitualmente suponen un grado bajo y los efectos sobre la salud humana por esta categoría no se pueden considerar factores de riesgo en comparación con otras categorías de impacto.	BAJO

f. Destrucción de la capa de ozono

Categoría de impacto que corresponde a la degradación del ozono estratosférico debida a las emisiones de sustancias que agotan la capa de ozono como, por ejemplo, gases de vida larga que contienen cloro y bromo.

Los efectos en la salud humana están relacionados con problemas de piel y oculares. Estudios epidemiológicos han demostrado que la radiación ultravioleta aumenta las probabilidades de sufrir cáncer de piel y juega un papel importante en el desarrollo de melanomas. Por otro lado, la exposición a una mayor radiación ultravioleta está relacionada con el desarrollo de cataratas oculares [41].

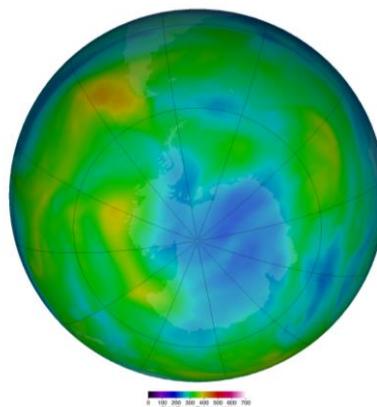
Por otro lado, el aumento de radiación ultravioleta (UV) de forma indirecta como consecuencia de la disminución de la capa de ozono, provoca daños en los procesos de desarrollo y fisiológicos de las plantas. A pesar de los mecanismos de los que disponen las plantas para remediar estos daños o adaptarse a mayores niveles de radiación ultravioleta, el crecimiento de las mismas puede verse afectado. Los cambios indirectos provocados por el aumento de los niveles de radiación, como por ejemplo cambios en la forma de la planta, la distribución de los ingredientes, tiempos de desarrollo de la planta o metabolismo, pueden constituir alteraciones más graves que el daño directo de la radiación. Estos cambios pueden acarrear importantes implicaciones en el equilibrio competitivo, enfermedades y ciclos biogeoquímicos.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

Uno de los eslabones más importantes en la cadena alimenticia acuática es el fitoplancton, cuya vida y reproducción está limitada a la zona de agua a la que llega suficiente luz solar para provocar dicha actividad. La exposición a la radiación ultravioleta se ha demostrado que afecta tanto a la orientación como a la movilidad del fitoplancton, desembocando en menores ratios de supervivencia para estos organismos. La alteración de un eslabón de la cadena alimenticia del ecosistema acuático puede provocar daños graves en la fauna del sistema.

De acuerdo con un estudio publicado en 2012, se han registrado valores del índice ultravioleta mayores entre los años 1955 y 2011 en Santiago de Chile partiendo de medidas realizadas entre enero y diciembre de esos años. Este hecho puede verse provocado por las reducciones de la capa de ozono en las latitudes medias y altas de la superficie terrestre. Sin embargo, el índice de radiación ultravioleta puede verse afectado por numerosos factores entre los que se encuentran variables atmosféricas, como aerosoles presentes en la atmósfera, presencia de gases O₃, SO₂ y NO₂, nubes y reflexión de la superficie. Concretamente, en Santiago de Chile, ciudad con presencia de contaminantes atmosféricos, pueden registrarse valores diferentes del valor esperado de índice UV [42].

De acuerdo con el Tercer Reporte del Estado del Medioambiente en Chile en 2016 [7] la disminución de la capa de ozono supone un problema frente al cual Chile es un país especialmente vulnerable. Esto se debe a la cercanía del territorio chileno al agujero de ozono Antártico. Es por esto por lo que Chile se viene comprometiendo y cumpliendo con los mecanismos de control, evaluación y prevención de los niveles de radiación ultravioleta, así como ha llevado a cabo esfuerzos en disminuir el uso de sustancias agotadoras de la capa de ozono.



⁵ Las zonas azuladas representan las zonas con menor cantidad de ozono y las naranjas con mayor cantidad

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

Tabla 24. Evaluación del impacto sobre el medio como consecuencia de generación de energía con origen nuclear

Destrucción de la capa de ozono	
<i>Efecto sobre la salud humana</i>	<i>Grado</i>
La destrucción de la capa de ozono está relacionada con el uso de algunas sustancias químicas. Concretamente en el sector nuclear, el uso de estas sustancias no supone un impacto significativo por lo que los efectos sobre la salud humana por estos procesos tampoco.	BAJO

g. Disminución de recursos hídricos

Categoría de impacto ambiental que se refiere al uso de agua.

El agua subterránea es el único recurso permanente de agua dulce en muchas regiones además de proveer de un neutralizador frente a climas extremos. Por otro lado, resulta un recurso imprescindible para el agua de consumo, para la seguridad alimenticia y para la supervivencia de los ecosistemas. Las principales consecuencias del abuso del agua subterránea son:

- ✓ Disminución del nivel del agua subterránea hasta un punto en el que ya no sea alcanzable. La escasez de agua subterránea exige que cada vez se requiera llevar a cabo exploraciones más invasivas para lograr alcanzar nuevos depósitos hidrológicos con las consecuencias económicas que esto puede acarrear
- ✓ Aumento de los costes de la misma: Una disminución de la disponibilidad de agua puede acarrear un aumento en el coste de la extracción ya que los procedimientos necesarios para disponer de ella serán cada vez más costosos o limitados.
- ✓ Como consecuencia de la reducción de los recursos de agua subterránea pueden verse disminuidos los recursos de agua superficial al estar ambos conectados.
- ✓ Hundimiento de la tierra: la sobreexplotación del agua subterránea puede provocar la pérdida del sustento bajo tierra.
- ✓ La disminución de los recursos hídricos podría tener una consecuencia directa en la calidad del agua, concretamente en las zonas cercanas a la costa. Puede producirse

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

contaminación con agua de mar debido a la posible mezcla de ambos tipos de agua al requerir extraer agua de zonas más profundas [44].

La productividad del sector agropecuario depende directamente de la disponibilidad de agua para el riego. De hecho, la agricultura no podría sobrevivir con una disponibilidad inadecuada de agua para el riego. La consecuencia directa de las restricciones en el uso del agua por la escasez de la misma es una reducción en la productividad de las cosechas, pudiendo llegar a no cubrir las necesidades del área en función de la zona.

Tabla 25. Evaluación del impacto sobre el medio como consecuencia de generación de energía con origen nuclear

Disminución de recursos hídricos	
<i>Efecto sobre la salud humana</i>	<i>Grado⁶</i>
<p>Durante la fase de construcción, puesta en marcha, operación y desmantelamiento se necesita un consumo de agua. El uso de esta agua está destinado fundamentalmente a tareas de refrigeración en operación normal y como depósitos en situaciones de emergencia. También tiene otras aplicaciones como fuente de agua desmineralizada, agua sanitaria, agua de limpieza...</p> <p>El recurso hídrico de Chile es lo suficientemente robusto como para asumir tecnologías de generación nuclear con dicha demanda de agua.</p>	-

4.3. Efectos particularizados a las tres regiones de estudio

De los resultados ofrecidos por el ACV en el Informe 1, la categoría de impacto con mayor contribución resulta ser la disminución de recursos minerales la cual corresponde prioritariamente a los procesos de minería del uranio. Sin embargo, no es posible atribuir este impacto a una zona localizada ya que estos procesos de minería se producirán en aquellos lugares que existan yacimientos mineros en los cuales se esté produciendo extracción de uranio. Esta información puede abarcar numerosas zonas a lo largo del mundo por lo que se considera

⁶ El grado de impacto de esta categoría no es posible conocerlo ya que el método de cálculo ReCiPe no ofrece valores de normalización para esta categoría

que no es un impacto sobre el cual se pueda tener margen de maniobra para decidir el emplazamiento.

4.3.1.Región de Antofagasta

Dadas las características de la región y atendiendo a las categorías de impacto más contribuyentes en el resultado del ACV del Informe 1, se puede destacar el impacto que puede suponer la transformación del suelo dado que en esta región se presentan grados de degradación del suelo elevados. Teniendo en cuenta que se trata de una zona con características desérticas y el grado de desertificación puede llegar en zonas a un estado grave, este impacto puede suponer más riesgo en esta región que en otras.

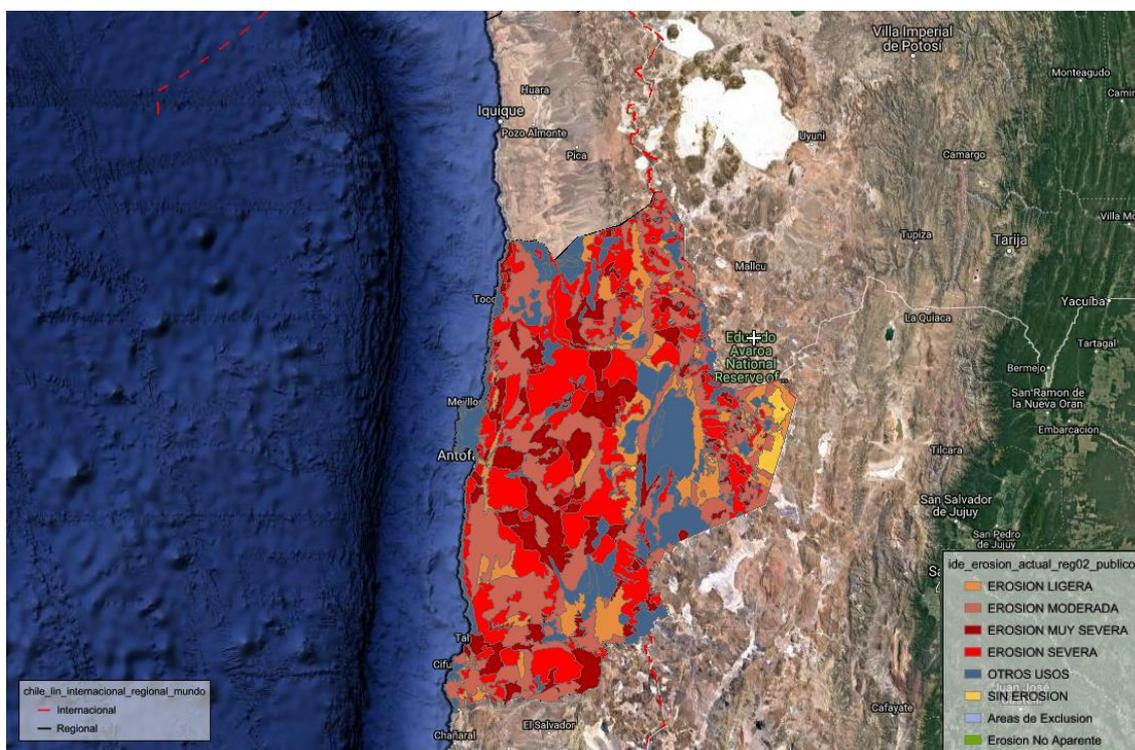


Figura 4-6. Estado de la erosión de la región de Antofagasta [45]

Respecto los efectos sobre la salud humana, si bien es cierto que las plantas de generación de energía nuclear de potencia durante la operación normal no suponen un riesgo a la salud humana debido a la radiación, la región ofrece zonas suficientemente alejadas de núcleos poblacionales.

En cuanto a la ecotoxicidad del agua, categoría de impacto sobre la cual también se tiene una contribución destacable en el análisis de ciclo de vida, no es posible elaborar un análisis significativo ya que en función del emplazamiento el recurso hidrológico empleado sería

diferente. Sin embargo, sí es posible destacar que el estado de dichos recursos empeora de sur a norte. Relacionado con los recursos hídricos, es la necesidad de la extracción del mismo para el abastecimiento de la actividad por lo que es necesario tener en cuenta las zonas de restricción y prohibición.

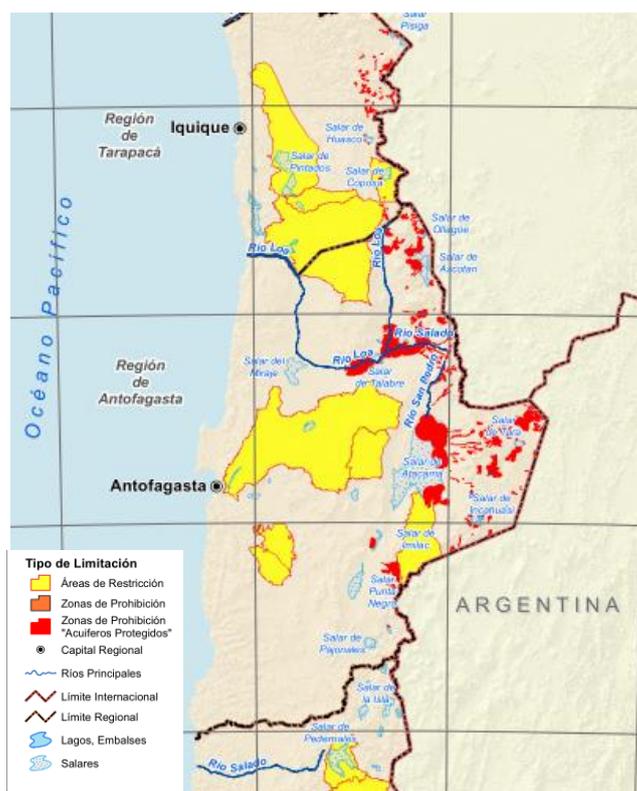


Figura 4-7. Áreas de restricción⁷ y zonas de prohibición⁸ de aguas subterráneas de la región de Antofagasta [46]

4.3.2. Región de Coquimbo

Atendiendo a las categorías de impacto priorizadas como las más significativas del ACV del Informe 1, respecto a la transformación del suelo destacar que en la región de Coquimbo se

⁷ La declaración de zona de prohibición es un mecanismo mediante el cual la DGA protege la sustentabilidad de un acuífero. Esta declaración, a diferencia del área de restricción, se produce cuando la disponibilidad del recurso hídrico se encuentra totalmente comprometida tanto en carácter de definitivo como provisional, por lo que no es posible constituir nuevos derechos de aprovechamiento

⁸ La declaración de área de restricción de aguas subterráneas es un instrumento utilizado por la Dirección General de Aguas para proteger Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHAC) donde exista grave riesgo de descenso en los niveles de agua con el consiguiente perjuicio a los derechos de terceros establecidos en él, o bien, cuando los informes técnicos emitidos por el Servicio demuestren que está en peligro la sustentabilidad del acuífero.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

presenta un escenario más estable respecto a la erosividad y desertificación, ofreciendo valores más moderados y leves que en el caso de Antofagasta.

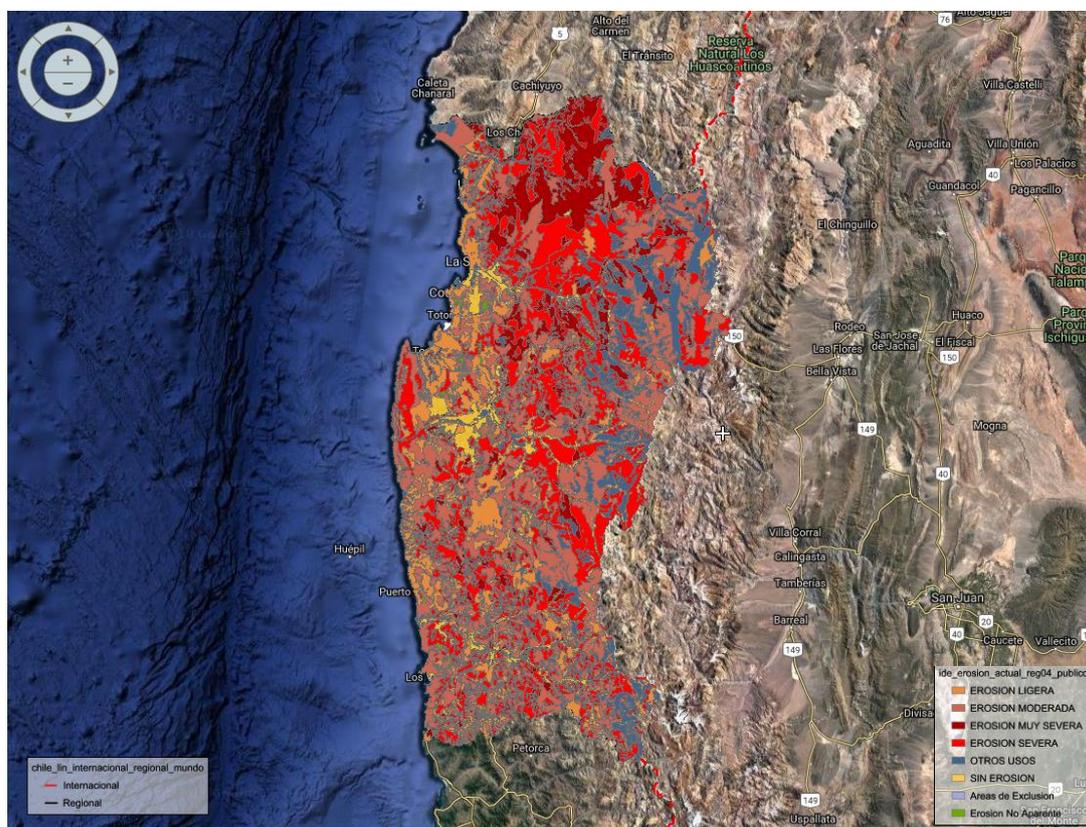


Figura 4-8. Estado de la erosión de la región de Coquimbo [45]

Se trata de una región con zonas con baja densidad de población, aunque como se especificaba en el caso de Antofagasta, la operación no supone un factor crítico en la radiación a las personas.

La categoría de ecotoxicidad del agua supone una influencia sobre los medios hídricos de la región que se ven más afectados de sur a norte, en orden descendente de la calidad del agua, de modo que, atendiendo a esto, ofrecería una mayor calidad del agua que Antofagasta. Relacionado con los recursos hídricos a continuación se indican las zonas de prohibición y restricción de uso de los mismos.



Figura 4-9. Áreas de restricción y zonas de prohibición⁹ de aguas subterráneas de la región de Coquimbo [46]

4.3.3.Región del Libertador General Bernardo O’Higgins

Atendiendo en primer lugar al estado del suelo de la región de cara a hacer frente a una de las categorías de impacto más significativas del ACV descrito en el Informe 1 destacar que se trata de una región con elevada variabilidad del estado del suelo en cuanto a erosividad y desertificación. De forma que el estado de la zona influirá en el impacto que puede suponer la transformación del suelo.

⁹ La declaración de área de restricción de aguas subterráneas es un instrumento utilizado por la Dirección General de Aguas para proteger Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHAC) donde exista grave riesgo de descenso en los niveles de agua con el consiguiente perjuicio a los derechos de terceros establecidos en él, o bien, cuando los informes técnicos emitidos por el Servicio demuestren que está en peligro la sustentabilidad del acuífero.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

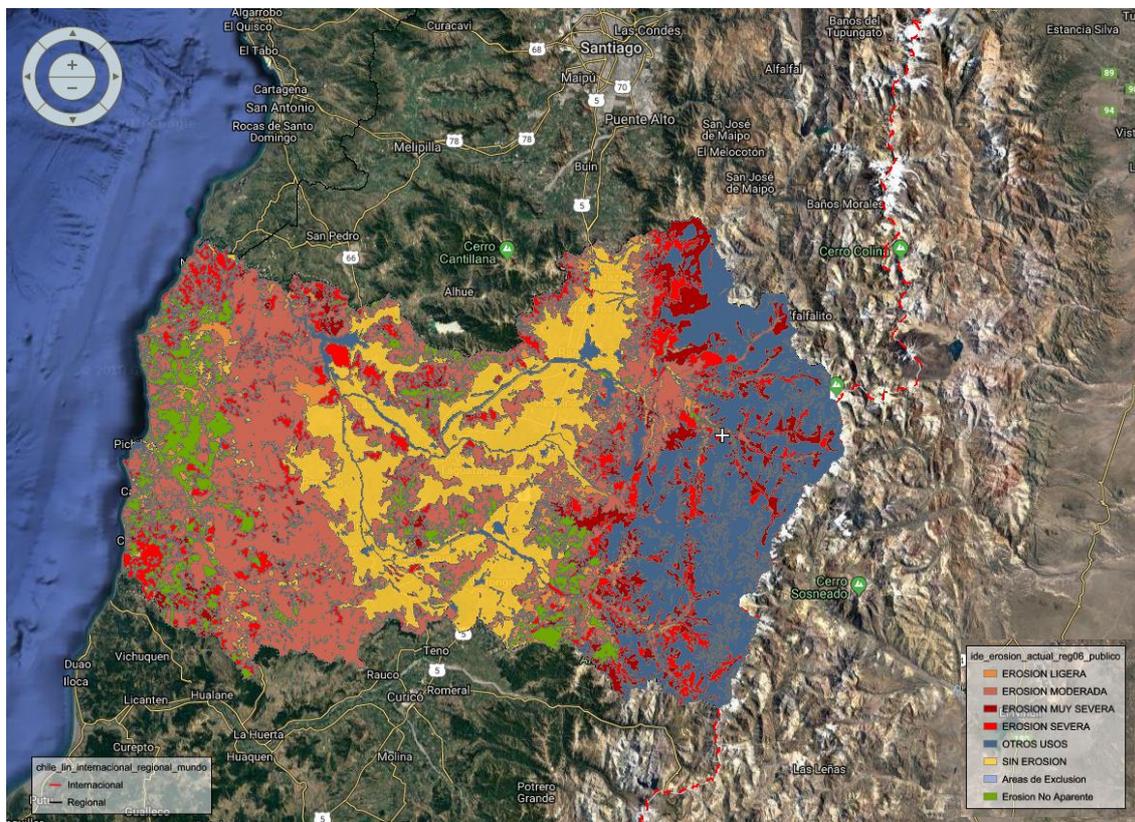


Figura 4-10. Estado de la erosión de la región del Libertador General Bernardo O'Higgins [45]

Esta región se trata de una región más poblada que las anteriores regiones destacadas, sin embargo, existen zonas lo suficientemente despobladas cercanas a núcleos poblacionales de elevada demanda energética. El estado de los ecosistemas terrestres se encuentra más afectado en esta región que en las demás por lo que debería ser un aspecto a tener en cuenta, dado que existen zonas en las que el estado de estos ecosistemas se presenta en peligro o en peligro crítico (Figura 3-24).

Por último, teniendo en cuenta la aproximación de que la calidad de los recursos hídricos aumenta de Norte a Sur, cabría esperar una mayor calidad de los recursos en esta región lo cual sería un punto para valorar de cara a afrontar el impacto de la ecotoxicidad del agua. Respecto a las restricciones de los usos de agua se detallan a continuación en la Figura 4-11.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2



Figura 4-11. Áreas de restricción y zonas de prohibición¹⁰ de aguas subterráneas de la región del Libertador General Bernardo O'Higgins [46]

¹⁰ La declaración de área de restricción de aguas subterráneas es un instrumento utilizado por la Dirección General de Aguas para proteger Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHAC) donde exista grave riesgo de descenso en los niveles de agua con el consiguiente perjuicio a los derechos de terceros establecidos en él, o bien, cuando los informes técnicos emitidos por el Servicio demuestren que está en peligro la sustentabilidad del acuífero.

5. IDENTIFICACIÓN DE LAS MEDIDAS TÉCNICAS, ADMINISTRATIVAS Y LEGALES IMPLEMENTADAS O EXIGIDAS A LA INDUSTRIA NUCLEAR PARA PREVENIR O MITIGAR LOS POSIBLES EFECTOS E IMPACTOS SOBRE LAS PERSONAS Y EL MEDIOAMBIENTE

En este apartado se analizarán un conjunto de medidas técnicas y administrativas que son de común aplicación en la industria nuclear. Todas estas medidas tienen su origen en la experiencia adquirida tras años de operación con el objetivo único de minimizar los impactos adversos de las tecnologías de generación nucleoelectrica sobre las personas y el medioambiente. Para abordar este objetivo se ha recurrido a las categorías de impacto analizadas en el Informe 1, de todas ellas, se han seleccionado aquellas cuya contribución es más destacada en el ACV. Para el resto de categorías de impacto, el efecto es mucho menor y, por tanto, las medidas adoptadas por la industria nuclear son escasas. Según esto, se han seleccionado las siguientes categorías:

- Disminución de los recursos minerales.
- Ecotoxicidad sobre el medio acuático.
- Radiación.

De esta selección de categorías de impacto, se pueden inferir dos conclusiones previas. En primer lugar, es notable la baja contribución de algunas categorías de impacto muy frecuentes en los estudios de impacto ambiental como son: las emisiones de CO₂ y la disminución de la capa de ozono. Como se ha indicado con anterioridad en el presente estudio, la generación de energía con origen nuclear se caracteriza por su escasa emisión de gases de efecto invernadero y, por tanto, su baja contribución al cambio climático. En segundo lugar, de las cuatro categorías de impacto seleccionadas, el impacto radiológico cobra una especial importancia. La componente radiológica que entraña la producción de energía eléctrica en centrales nucleares es una de las consecuencias de mayor relevancia en este sector por varios motivos. Este impacto no está presente en otro tipo de tecnologías de generación eléctrica como las energías renovables. Por otro lado, la naturaleza radiactiva entraña un riesgo adicional cuyas consecuencias tienen una gran repercusión medioambiental en caso de accidente. Finalmente, la opinión pública sobre la energía nuclear se fundamenta principalmente en el impacto radiológico que supone un argumento determinante a la hora de simpatizar o no con este tipo de tecnología. Precisamente por la particularidad que supone el impacto radiológico, como se verá en el desarrollo del apartado, el detalle en cuanto a medidas que pretenden mitigar este efecto es mucho mayor que para las otras tres categorías consideradas.

5.1. Medidas para la mitigación en la disminución de los recursos minerales

Existe una preocupación creciente que se extiende en todo el mundo sobre la disponibilidad a futuro de las materias primas empleadas en el sector industrial y energético. Es bien sabido que las reservas de recursos naturales son cada vez más limitadas. En concreto, el uranio es una materia prima de la que se disponen unas reservas finitas en el planeta.

Del estudio del ACV realizado en el Informe 1 se concluye que una de las principales categorías de impacto de las centrales nucleares es la reducción de los recursos minerales lo cual se traduce en una disminución de las reservas de uranio. La industria nuclear ha sido consciente de este hecho desde sus inicios por lo que ha desarrollado diferentes medidas técnicas con el fin de gestionar de manera más eficiente los recursos en materia de combustible nuclear. La mayoría de estas técnicas buscan aumentar el rendimiento energético del combustible nuclear, es decir, “exprimir” al máximo la energía que encierra la pastilla de combustible. Dado el carácter científico-tecnológico de estas soluciones, las medidas que a continuación se exponen son puramente técnicas:

Mejora de la eficiencia del ciclo de combustible: alargamiento del ciclo de quemado

En los últimos años se han llevado a cabo importantes investigaciones encaminadas hacia la mejora de los ciclos de quemado del combustible [47] [48] [49]. Motivadas en un primer momento por cuestiones económicas, estas investigaciones suponen un mejor aprovechamiento del combustible y, con ello, una demanda más sostenible de las reservas del uranio.

El aumento del tiempo entre las paradas planificadas para recarga o, lo que es lo mismo, el alargamiento del ciclo de quemado permite que el combustible permanezca durante más tiempo dentro del reactor por lo que se aprovecha de forma más eficiente.

Reprocesado del combustible

Como se ha comentado en el Informe 1, el reprocesado del combustible supone una nueva vía para la gestión del combustible gastado y, al mismo tiempo, no deja de ser una forma de obtener un mayor rendimiento del combustible nuclear. Desde la perspectiva de minimizar el impacto sobre los recursos naturales, el desarrollo de la técnica de reprocesado constituye un ejemplo de aprovechamiento del combustible. El combustible que se desecha tras su paso por el núcleo puede ser reaprovechado, tras una serie de tratamientos, para seguir obteniendo energía de él. En este caso, la materia prima pasa a ser uranio natural y plutonio en forma de combustible MOX.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

Por lo tanto, el uranio inicial extraído de los recursos terrestres que ha pasado por el núcleo del reactor puede ser reutilizado para seguir produciendo electricidad [50].

Diseños avanzados de combustible

El desarrollo de la industria nuclear siempre va ligado a un aumento de la seguridad de las centrales nucleares. Persiguiendo este objetivo y, al mismo tiempo, aprovechando las potenciales ventajas económicas, se han diseñado nuevas tecnologías para los combustibles nucleares capaces de ofrecer un mayor rendimiento de quemado llegando a alcanzar ciclos de 18 o, incluso 24 meses entre recarga (actualmente el tiempo entre recargas ronda los 6 meses).



Figura 5-1. Lightbridge fuel.

Cambio de materia prima: energía nuclear basada en el ciclo del torio

Existe un creciente interés entre los países usuarios de la energía nuclear por el uso del ciclo del combustible de torio para abordar el crecimiento sostenible del sector nuclear [51]. Los principales incentivos para el uso de torio son:

- abundancia natural de recursos de torio
- naturaleza inerte de dióxido de torio
- propiedades termo-físicas mejoradas en comparación con el dióxido de uranio
- alta capacidad de quemado
- resistencia a la proliferación nuclear

Los combustibles basados en torio se han estudiado para sus aplicaciones potenciales en casi todos los tipos de reactores, incluidos PWR, BWR, PHWR, aunque a menor escala en comparación con los combustibles U / U-Pu.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

El torio presenta unas características físicas y neutrónicas que pueden explotarse en los sistemas de energía nuclear actuales, así como las tecnologías de generación futuras.

Algunos países opinan que el despliegue a corto plazo de combustibles de torio en tipos de reactores probados no solo es factible, sino también atractivo para contribuir a satisfacer las crecientes necesidades energéticas. Varias opciones también están bajo consideración e incluso en desarrollo activo para su implementación a más largo plazo.

En 2012, la IAEA inició un Proyecto Coordinado de Investigación sobre opciones a corto y largo plazo para el despliegue de la energía nuclear basada en torio. Canadá, China, República Checa, Alemania, India, Israel, Italia y EEUU participan en este CRP. El Proyecto Coordinado de Investigación proporcionará una plataforma para compartir los resultados de la investigación y la experiencia previa.

Tabla 26. Reservas mundiales de torio [52].

País	Toneladas
India	846.000
Brasil	632.000
Australia	595.000
Estados Unidos	595.000
Egipto	380.000
Turquía	374.000
Venezuela	300.000
Canadá	172.000
Rusia	155.000
Sudáfrica	148.000
China	100.000
Noruega	87.000
Groenlandia	86.000
Finlandia	60.000
Suecia	50.000
Kazajistán	50.000
Otros países	1.725.000
Total Mundial	6.355.000

5.2. Medidas para la mitigación en la ecotoxicidad del medio acuático

En el caso de las centrales nucleares, el agua juega un papel crucial en la generación de energía. Muchos países muestran su preocupación sobre la necesidad de asegurar los recursos hídricos para operar centrales nucleares y, de manera simultánea, buscar estrategias para una gestión eficiente del agua respetando el medioambiente. El desarrollo de estas cuestiones ambientales ha dado lugar a regulaciones que limitan, no solo la descarga de agua procedente de planta sino también la extracción de esta. Las medidas implantadas para paliar el efecto de las centrales nucleares sobre el medio hídrico se diferencian en dos grupos atendiendo a dos problemáticas: la emisión de sustancias químicas nocivas para el medioambiente y la modificación de la temperatura natural del medio acuático, o lo que es lo mismo, la contaminación térmica.

El estudio de las descargas en las centrales nucleares suele centralizarse en los impactos radiológicos. Sin embargo, existen otra serie de emisiones de materiales químicos no radioactivos. En Europa, las descargas de sustancias específicas a las aguas superficiales se controlan bajo dos directivas fundamentales emitidas por la Comisión Europea:

- La Directiva 2006/11/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15 de febrero de 2006, relativa a la contaminación causada por determinadas sustancias peligrosas vertidas en el medio acuático de la Comunidad.
- La Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas.

La Directiva sobre el vertido de sustancias peligrosas especifica dos listas de sustancias peligrosas. La Lista I cubre sustancias que son particularmente tóxicas y persistentes, y que pueden tender acumularse en el medioambiente, mientras que esas sustancias en la Lista II siguen siendo tóxicas, pero un grado menor.

La Directiva marco sobre el agua proporciona una base para un enfoque más reciente en la gestión del agua. El alcance de esta directiva incluye la protección de todas las masas de agua, aguas superficiales y subterráneas. Sus requisitos contemplan la clasificación de todos los cuerpos de agua en términos de su calidad química y biológica.

En este apartado se analizará de forma general las medidas adoptadas por tres países que sirven de referencia en materia medioambiental y nuclear: Reino Unido, Francia y Estados Unidos.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

Dado que las descargas no-radiológicas se encuentran fuera del ámbito puramente nuclear y entran una perspectiva medioambiental, los organismos reguladores de estas cuestiones pueden ser de naturaleza nuclear y radiológica o puramente medioambiental. Por ello, la autoridad competente en materia de mitigación del impacto de la ecotoxicidad sobre el medio acuático depende de cada país. En el caso de Reino Unido, la responsabilidad recae sobre *Environment Agency* mientras que en Francia es *Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN)* y en Estados Unidos, *US Environmental Protection Agency*.

Los tres países optan por enfatizar en la importancia del desarrollo de las mejores técnicas (*Best Available Techniques*, BAT) para minimizar las descargas de materiales químicos y, por tanto, reducir su impacto sobre el ecosistema y la salud humana. El principal criterio de control sobre este tipo de efluentes es el establecimiento de una serie de parámetros límite:

- En Reino Unido, los límites para las descargas de productos químicos cubren un conjunto relativamente pequeño de parámetros en el inventario de agua de refrigeración principal. Los límites se expresan en términos de la diferencia entre las concentraciones medidas a la entrada del sistema de agua de refrigeración y a la salida.
- En EEUU se incluyen límites para los productos químicos descargados en los sistemas internos de planta antes de que descarguen al flujo principal de agua de refrigeración. Bajo este enfoque, la aplicación de las BAT tiene lugar en la fuente de producción y no en el momento de la descarga final. Además de estos umbrales, también se aplican límites adicionales sobre las concentraciones de los productos químicos liberados en el canal de descarga. En este punto se valúan sólidos suspendidos, aceite y grasa y productos químicos presentes después de la cloración.
- Los límites de las descargas químicas en Francia se aplican sobre el agua de los tanques de la isla nuclear y los sistemas de turbina. Estos límites se controlan sobre todas las descargas independientemente de la frecuencia de estas (cada dos horas, diarias o anuales). Estos límites se establecen como concentraciones máximas permitidas en los tanques o en las vías de descarga. Este enfoque permite a los operadores optimizar el tiempo entre descargas y, con ello, minimizar sus impactos. Los límites se particularizan para cada sistema de refrigeración.

Todas estas medidas están encaminadas a controlar una serie de productos químicos concretos que se enumeran a continuación:

- Hidracina.
- Cloruros.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

- Sulfatos.
- Sales de amonio y amonia.
- Hidrocarburos.
- Fosfatos y compuestos fosforados.
- Metales pesados.
- Descargas procedentes del circuito primario como ácido bórico o hidróxido de litio.

En el documento “*Chemical discharges from nuclear power stations: historical releases and implications for Best Available Technology*” [53] desarrollado por Environment Agency (UK) se puede encontrar un análisis detallado de las BAT aplicadas a cada uno de los compuestos químicos anteriores.

Por otro lado, en lo referente al cambio de la temperatura en el medio acuático, la contaminación térmica se considera más pronunciada en las plantas nucleares que en otras plantas basadas en la quema combustibles fósiles. Una central nuclear descarga aproximadamente el 50% más de calor residual en las aguas receptoras que una planta de combustibles fósiles que produce la misma cantidad de electricidad [29].

Modificar la temperatura del agua puede tener un impacto sobre la flora y la fauna presentes en el ecosistema acuático. En este sentido, puede favorecer el crecimiento de ciertas especies que no son características de la zona en detrimento de las especies autóctonas con los consiguientes desequilibrios que puede producir este hecho. Este impacto afecta a las inmediaciones del canal de descarga independientemente de cual sea el medio acuático de refrigeración, es decir, este efecto repercute a ríos, embalses, estuarios y al mar.

La medida técnica más eficaz para controlar este efecto es llevar a cabo una vigilancia sobre las propiedades físicas del canal de descarga. Para ello, según lo establecido en el documento *Thermal Discharges at Nuclear Power Stations (Technical Reports Series No. 155, IAEA)* [54], es necesario realizar una monitorización de los siguientes parámetros:

- Características de los efluentes:
 - Caudal de descarga.
 - Distribución de temperaturas.
 - Diferencias de densidad con respecto a la densidad del agua de entrada.
 - Velocidad del agua a la salida.
- Características del canal de descarga:
 - Localización.
 - Orientación.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

- Altura del canal.
- Forma.
- Profundidad y anchura del canal.

Además de la monitorización de los parámetros del canal de descarga, se establecen una serie de límites en cuanto al aumento de la temperatura en el medio acuático. La siguiente tabla resume alguno de estos límites establecido en la normativa de Estados Unidos [54]:

Tabla 27. Límites en el incremento de temperatura del canal de descarga (EEUU).

Sistema de refrigeración en la descarga	Incremento máximo de temperatura (°C)
Ríos	2.8
Lagos o embalses	1.7
Estuarios y mar (en verano)	0.8
Estuarios y mar (en invierno)	2.2

Tanto la emisión de productos químicos como el calentamiento del medio acuático tienen una fuerte dependencia de la operación de la instalación, la IAEA emite sus recomendaciones enfocadas a los sistemas de tratamiento químico presentes en planta y a los sistemas de refrigeración. A continuación, se enumeran alguno de estos documentos:

- *Chemistry Programme for Water Cooled Nuclear Power Plants. Specific Safety Guide No. SSG-13 (IAEA) [55].* El objetivo de esta Guía de seguridad es proporcionar recomendaciones para el funcionamiento seguro de las centrales nucleares de acuerdo con mejores prácticas internacionales para los programas de tratamiento de productos químicos. Esta guía aplica a distintas tecnologías de generación nucleoelectrónica (BWR, PWR, RBMK, VVER...) en las distintas fases de la vida de la planta (puesta en marcha, operación normal, transitorios, parada y desmantelamiento) estableciendo unos límites para los parámetros químicos y las condiciones de operación.
- *Design of the Reactor Coolant System and Associated Systems in Nuclear Power Plants. Safety Guide No. NS-G-1.9 (IAEA) [56].* El propósito de esta guía es proporcionar recomendaciones y orientaciones a los organismos reguladores, diseñadores de plantas de energía nuclear y titulares de licencias de explotación acerca del diseño de los Sistemas de Refrigeración y otros sistemas asociados con el fin de otros sistemas asociados con el fin de asegurar una operación segura de la planta con relación a su refrigeración.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

Por otro lado, la Environment Agency de Reino Unido ha desarrollado un documento titulado *Cooling Water Options for the New Generation of Nuclear Power Stations in the UK* [57] en el que se investigan las opciones actuales y futuras para los sistemas de refrigeración en plantas nucleares evaluando su impacto sobre el medioambiente (personas, ecosistemas y biota) desde una perspectiva química, térmica y radiactiva.

5.3. Medidas para la mitigación de los efectos nocivos de la radiación

El impacto radiológico de las centrales nucleares es uno de los principales signos que diferencian este tipo de tecnología del resto de formas de producción energética. Por ello, desde sus inicios, la industria nuclear ha invertido grandes esfuerzos en controlar y mitigar los efectos de la radiación mediante el monitoreo de efluentes, la aplicación del principio ALARA (As Low As Reasonably Achievable), el establecimiento de límites de seguridad...

Para enfocar todas aquellas disposiciones que se han ido implementando con el fin de minimizar el impacto radiológico de las centrales nucleares, se van a analizar las medidas establecidas por organismos internacionales y países usuarios de la energía nuclear que sirven de referencia en materia de seguridad y protección radiológica

5.3.1. IAEA

Con el fin de garantizar la protección de las personas y el medioambiente contra los efectos nocivos de las radiaciones ionizantes, las normas de seguridad del IAEA establecen principios, requisitos y medidas fundamentales de seguridad para controlar la exposición de las personas a las radiaciones y la liberación de material radiactivo al medioambiente.

Las normas se aplican a las instalaciones y actividades que dan lugar a riesgos de radiación, incluidas las instalaciones nucleares, el uso de radiación y fuentes radiactivas, el transporte de materiales radiactivos y la gestión de residuos radiactivos. Las medidas de seguridad y las medidas de seguridad tienen en común el objetivo de proteger la vida y la salud humanas y el medioambiente. Las normas de seguridad del IAEA reflejan un consenso internacional sobre lo que constituye un alto nivel de seguridad para proteger a las personas y el medioambiente de los efectos nocivos de las radiaciones ionizantes. En esta línea, la IAEA publica una serie de normas de seguridad divididas en tres categorías:

- Las **Nociones Fundamentales de Seguridad** presentan los objetivos y principios fundamentales de protección y seguridad, y constituyen la base de los requisitos de seguridad.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

- Los **Requisitos de Seguridad** son un conjunto integrado y coherente de requisitos de seguridad donde se establecen los requerimientos que se han de cumplir para garantizar la protección de las personas y el medioambiente, tanto en el presente como en el futuro.
- Las **Guías de Seguridad** ofrecen recomendaciones y orientaciones sobre cómo cumplir los requisitos de seguridad llevando a un consenso internacional de que es necesario adoptar las medidas recomendadas.

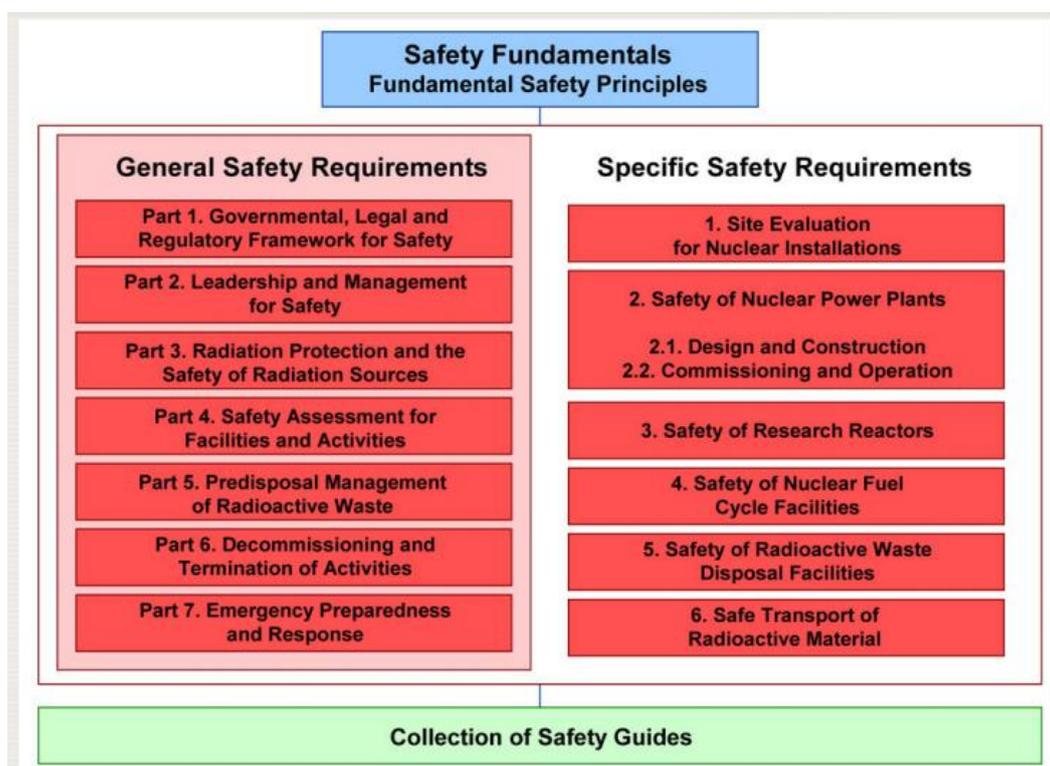


Figura 5-2 . Esquema de las recomendaciones emitidas por la IAEA.

La protección radiológica del medioambiente y del público es una preocupación presente en prácticamente todos los ámbitos del sector nuclear. Por ello, en el esquema anterior, los aspectos de protección radiológica son comunes a varias secciones dentro de los Requisitos de Seguridad entre las que destacan:

- Marco gubernamental, jurídico y regulador para la seguridad (Governmental, Legal and Regulatory Framework for Safety N° GSR Part 1) [58] .
- Protección radiológica y seguridad de las fuentes de radiación: Normas básicas internacionales de seguridad (Radiation Protection and the Safety of Radiation Sources N° GSR Part 3) [59].

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

- Estudio de seguridad de instalaciones y actividades (Safety Assessment for Facilities and Activities No. GSR Part 4) [60].
- Gestión previa a la disposición final de desechos radiactivos (Predisposal Management of Radioactive Waste N° GSR Part 5) [61].
- Desmantelamiento de instalaciones (Decommissioning of Facilities No. GSR Part 6) [62].
- Preparación y respuesta ante emergencias nucleares o radiológicas (Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency No. GSR Part 7) [63].

Todos estos Requisitos de Seguridad están orientados al explotador de la central nuclear, a los organismos reguladores en materia nuclear y a los tecnólogos encargados del diseño de las plantas nucleares.

Estos Requisitos de Seguridad se materializan a través de las Guías de Seguridad y se concretan aún más mediante los Documentos Técnicos. La siguiente tabla muestra una relación de Guías de Seguridad en relación a la mitigación y prevención de los efectos no deseados de las radiaciones ionizantes generadas en las tecnologías nucleoelectricas:

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

Guías de Seguridad		
Título	Año	Contenido
Radiation Protection of the Public and the Environment No. GSG-8 [64]	2018	En este documento se establece un marco regulatorio general destinado a establecer una serie de normas para controlar la protección del público y del medioambiente.
Radiation Protection Aspects of Design for Nuclear Power Plants No. NS-G-1.13 [65]	2005	El propósito de esta Guía es proporcionar recomendaciones que garanticen la protección radiológica en el diseño de nuevas centrales nucleares, en las modificaciones de diseño en plantas en operación y en las revisiones de seguridad de plantas en operación. Estas recomendaciones están encaminadas a cumplir los requisitos de seguridad fundamentales protegiendo a las personas y el medioambiente frente a posibles daños mediante el establecimiento de medidas efectivas contra riesgos radiológicos.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

Guías de Seguridad		
Título	Año	Contenido
Radiation Protection and Radioactive Waste Management in the Operation of Nuclear Power Plants N° NS-G-2.7 [66]	2002	La finalidad de esta Guía es formular recomendaciones dirigidas al organismo regulador centradas en los aspectos operacionales de la protección radiológica y la gestión de desechos radiactivos de las centrales nucleares. Esta Guía también será de utilidad para el personal directivo superior de las entidades licenciadas o contratistas encargado de establecer y administrar los programas de protección radiológica y de gestión de desechos radiactivos.
Occupational Radiation Protection N° RS-G-1.1 [67]	1999	El objetivo de esta Guía de seguridad es brindar orientación sobre el control de las exposiciones ocupacionales de los trabajadores. Las recomendaciones dadas están destinadas a las autoridades reguladoras, pero también son de utilidad a operadores, titulares, órganos de dirección y sus asesores especializados, así como a los comités de salud y seguridad que tienen que ver con la protección radiológica de los trabajadores. Los

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N°2

Guías de Seguridad		
Título	Año	Contenido
		trabajadores y sus representantes también pueden utilizar las recomendaciones para promover prácticas de trabajo seguras.
Assessment of Occupational Exposure Due to External Sources of Radiation RS-G-1.3 [68]	1999	El propósito de esta Guía de seguridad es suministrar una amplia orientación a las autoridades reguladoras para cumplir los requisitos y llevar a cabo una evaluación eficaz de la exposición ocupacional a fuentes externas de radiación ionizante. La Guía de seguridad resultará útil también para los interesados en la planificación y gestión de programas de vigilancia radiológica ocupacional, para los responsables de la operación de servicios de vigilancia individual y para los participantes en el diseño de dosímetros y equipos utilizados en la dosimetría personal y en la vigilancia radiológica de los lugares de trabajo

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

Guías de Seguridad		
Título	Año	Contenido
Assessment of Occupational Exposure Due to Intakes of Radionuclides RS-G-1.2 [69]	1999	El propósito de esta Guía de seguridad es proporcionar orientación a las autoridades reguladoras sobre la evaluación de las incorporaciones de material radiactivo debidas a la exposición ocupacional. Esta Guía también será útil para quienes se ocupan de la planificación, la dirección y la aplicación de programas de vigilancia radiológica ocupacional y para los participantes en el diseño del equipo que se emplea en la vigilancia radiológica de los lugares de trabajo y en la dosimetría interna
Occupational Radiation Protection in the Mining and Processing of Raw Materials RS-G-1.6 [70]	2004	El fin principal de esta guía de seguridad es dar orientación práctica a los órganos reguladores para satisfacer los requisitos relativos a la protección radiológica de quienes trabajen en la extracción y tratamiento de las materias primas. La guía también será útil a los operadores, los titulares, los órganos de administración y sus especialistas consultores y a los comités de salud y seguridad que tengan que ver con la protección radiológica ocupacional. Los

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

Guías de Seguridad		
Título	Año	Contenido
		trabajadores y sus representantes pueden utilizarla también como respaldo de prácticas laborales seguras. Esta guía de seguridad tiene asimismo la finalidad de facilitar la preparación y adopción de reglamentos nacionales y locales, así como de normas y procedimientos de trabajo para la protección radiológica en la minería y el tratamiento de las materias primas.
Storage of Spent Nuclear Fuel No. SSG-15 [71]	2012	El objetivo de esta Guía de seguridad es proporcionar orientación actualizada y recomendaciones sobre el diseño, el funcionamiento seguro y la evaluación de la seguridad para los diferentes tipos de instalaciones de almacenamiento de combustible nuclear gastado (húmedo y seco), considerando diferentes tipos de combustible nuclear gastado de reactores nucleares, incluida la investigación reactores y diferentes períodos de almacenamiento.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N°2

Guías de Seguridad		
Título	Año	Contenido
Near Surface Disposal Facilities for Radioactive Waste No. SSG-29 [72]	2014	El objetivo de esta Guía de seguridad es proporcionar orientación y recomendaciones relacionadas con el desarrollo, la operación, el cierre y el control de las instalaciones para almacenamiento en superficie de los residuos radiactivos. Está destinado principalmente a aquellos involucrados en el desarrollo de políticas y el control y regulación de este tipo de instalaciones
Monitoring and Surveillance of Radioactive Waste Disposal Facilities SSG-31 [73]	2014	El objetivo de esta Guía de seguridad es proporcionar una guía para el monitoreo y la vigilancia de las instalaciones de almacenamiento de residuos radiactivos.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N°2

Guías de Seguridad		
Título	Año	Contenido
Regulatory Control of Radioactive Discharges to the Environment WS-G-2.3 [74]	2007	El propósito de esta guía de seguridad es describir cómo aplicar los requisitos fundamentales de seguridad de los residuos y la protección radiológica en el control de las descargas de radionucleidos al medioambiente procedentes de la operación normal. En ella se facilita a los órganos reguladores (un enfoque estructurado respecto a la limitación de los riesgos para los miembros del público y a la optimización de la protección frente a este tipo de actividades. Este enfoque puede adaptarse a la infraestructura jurídica y reglamentaria específica, en cuyo marco estos órganos reguladores actúen. También se proporciona asesoramiento sobre las responsabilidades de los titulares registrados y titulares de licencias en la ejecución de las operaciones de descarga radiactiva.

5.3.2. Directivas EURATOM

Las actividades de investigación energética de EURATOM se llevan a cabo en virtud de lo dispuesto en el Tratado que, en 1957, estableció la Comunidad Europea de la Energía Atómica (EURATOM), que está dotada de una estructura jurídica específica y dispone de un Programa Marco de Investigación propio que, sin embargo, es gestionado por las instituciones comunitarias.

De entre todas las misiones de EURATOM, destacan tres por su particular incidencia en la mitigación del riesgo radiológico. La primera consiste en el establecimiento de normas de seguridad uniformes para la protección radiológica de la población y de los trabajadores, velando por su aplicación. La segunda busca garantizar mediante los controles adecuados que los materiales nucleares no serán utilizados para fines distintos de aquellos a los que estén destinados. La tercera establece con los demás países y con las organizaciones internacionales aquellas relaciones que promuevan el progreso en la utilización pacífica de la energía nuclear.

Las instituciones comunitarias dictan normas de gran incidencia en la regulación nacional de cada país. Estas normas se basan en las disposiciones del Tratado EURATOM.

La siguiente tabla recoge todas aquellas Directivas EURATOM que son de aplicación sobre la mitigación del riesgo radiológico derivado de la explotación de plantas de generación nucleoelectrónica:

Tabla 28. Relación de las Directivas EURATOM de aplicación directa en la mitigación del impacto radiológico sobre el medioambiente y las personas

Directiva	Contenido
<p>Directiva 2013-51 EURATOM del Consejo de 22 de octubre de 2013 por la que se establecen requisitos para la protección sanitaria de la población con respecto a las sustancias radiactivas en las aguas destinadas al consumo humano [75].</p>	<p>Esta directiva establece que los Estados Miembros adoptarán todas las medidas necesarias para establecer un programa apropiado de control del agua destinada al consumo humano y aplicarán las medidas correctoras necesarias en caso de incumplimiento de los límites.</p> <p>En Anexo I de esta directiva se recogen los valores paramétricos medidos en unidades de actividad volumétrica para el tritio y el radón presentes en el agua destinada a consumo humano. También muestra el valor paramétrico de las dosis indicativas (dosis efectiva) comprometida por un año de ingesta debida a todos los radionucleidos cuya presencia se haya detectado en una fuente de abastecimiento de agua destinada al consumo humano, ya sean de origen natural o artificial, excluidos el tritio, el potasio-40, el radón y los productos de desintegración del radón de vida corta.</p>
<p>Directiva 2006-117-EURATOM, del Consejo, de 20 de noviembre de 2006, relativa a la vigilancia y al control de los traslados de residuos radiactivos y combustible nuclear gastado [76].</p>	<p>Esta Directiva establece un régimen comunitario de vigilancia y control de los traslados transfronterizos de residuos radiactivos y combustible gastado para garantizar una protección adecuada de la población</p>

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe
Nº 2

Directiva	Contenido
<p>Directiva 2011-70-EURATOM, del Consejo, de 19 de julio de 2011, por la que se establece un marco comunitario para la gestión responsable y segura del combustible nuclear gastado y de los residuos radiactivos [77].</p>	<p>La presente Directiva establece un marco comunitario para asegurar la gestión responsable y segura del combustible nuclear gastado y de los residuos radiactivos, con el fin de evitar imponer a las generaciones futuras cargas indebidas.</p> <p>Además, la directiva asegura que los Estados miembros establezcan medidas nacionales adecuadas para lograr un alto nivel de seguridad en la gestión del combustible nuclear gastado y de los residuos radiactivos, a fin de proteger a los trabajadores y a la población de los peligros derivados de las radiaciones ionizantes.</p>
<p>Directiva 2013-59-EURATOM, del Consejo, de 5 de diciembre de 2013, por la que se establecen normas de seguridad básicas para la protección contra los peligros derivados de la exposición a radiaciones ionizantes, y se derogan otras Directivas [78].</p>	<p>La presente Directiva establece normas básicas de seguridad uniformes aplicables a la protección de la salud de las personas sometidas a exposición ocupacional, médica y poblacional frente a los riesgos derivados de las radiaciones ionizantes.</p> <p>En esta directiva se establecen:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Restricciones de dosis para la exposición ocupacional, poblacional y médica. – Niveles de referencia – Limitación de dosis (trabajadores expuestos, población, mujeres gestantes y estudiantes)

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

Directiva	Contenido
RECOMENDACIÓN DE LA COMISIÓN de 18 de diciembre de 2003 relativa a la información normalizada sobre los efluentes radiactivos gaseosos y líquidos vertidos al medioambiente por las centrales nucleares y las plantas de reelaboración en condiciones de funcionamiento normal [79].	En esta recomendación se identifica el tipo de información que debe controlarse y transmitirse a la Comisión Europea sobre los radionucleidos vertidos o susceptibles de ser vertidos por las centrales nucleares y las plantas de reelaboración en condiciones de funcionamiento normal.

5.3.3. Estados Unidos

En el caso de Estados Unidos, como referencia en el sector nuclear, las competencias en materia de protección radiológica quedan transferidas a la Environmental Protection Agency. Desde este organismo se emite la regulación pertinente con el fin de proteger a las personas y al medioambiente de los riesgos asociados a la liberación de materiales peligrosos, en este caso, de material radiactivo. Todas estas normas aplican sobre las personas, los estados, los gobiernos locales, los explotadores de las plantas y otras instituciones que guarden relación con la industria nuclear.

Dado el carácter de las regulaciones emitidas por la Environmental Protection Agency, todas estas disposiciones se recogen en el Code of Federal Regulations. A continuación, se enumeran las leyes que tienen como objetivo regular la operación de la industria nuclear con el fin de proteger el medioambiente:

- **Normativa para la protección contra la radiación en el medioambiente en las operaciones de centrales nucleares (40 CFR Part 190).** Esta normativa regula las operaciones en centrales nucleares limitando las emisiones y las dosis de radiación para el público, producto de la operación normal (no de emergencia) de las centrales nucleares y otras instalaciones con ciclo de combustible de uranio.
- **Normativa para la protección contra la radiación en el medioambiente en la gestión y la eliminación de combustible gastado, los residuos de alta actividad y los transuránicos (40 CFR Part 191).** Esta reglamentación establece las normas ambientales para la eliminación de combustible nuclear agotado, residuos de alta actividad y residuos transuránicos radiactivos.
- **Normativa para la protección de la salud y el medioambiente contra los residuos de tratamiento del uranio y el torio (40 CFR Part 192).** Esta reglamentación establece las normas para la protección de la salud pública, la seguridad y el medioambiente de los peligros radiológicos y no radiológicos asociados con el tratamiento de minerales de uranio y torio y la eliminación de los residuos relacionados. En enero de 2017, la Environmental Protection Agency propuso cambios al título 40, parte 192 del CFR para establecer los requisitos de restauración y control de aguas subterráneas en instalaciones de recuperación in situ.
- **Criterios para la certificación y recertificación del cumplimiento de la reglamentación sobre eliminación de residuos en la planta piloto para el almacenamiento y aislamiento de residuos (40 CFR Part 194).** Estos criterios se

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

aplican a la certificación y recertificación del cumplimiento de las normas para la eliminación de los residuos radiactivos en la planta piloto para el aislamiento de desechos de Nuevo México. La WIPP es un depósito geológico profundo a cargo del Departamento de Energía de los Estados Unidos. (DOE, por sus siglas en inglés) para la eliminación permanente de un tipo específico de residuos del programa de defensa nuclear de la nación.

- **Normas para la protección de la salud pública y el medioambiente contra la radiación en montaña Yucca, Nevada (40 CFR Part 197).** Esta reglamentación, promulgada en 2008, establece normas para la salud pública y el medioambiente en relación con el almacenamiento y la eliminación de combustible nuclear gastado en el depósito propuesto de la montaña Yucca, en Nevada. La Nuclear Regulatory Commission de los Estados Unidos pondrá en vigor esta reglamentación en montaña Yucca si se estableciese un depósito allí.

- **Normas nacionales sobre emisiones para contaminantes peligrosos en el aire (40 CFR Part 61).** La Ley de Aire Limpio requiere a la Environmental Protection Agency que regule las emisiones al aire de contaminantes atmosféricos peligrosos de una lista específica de fuentes industriales llamadas “categorías de fuente”. Las normas conocidas como las “Normas nacionales sobre emisión para contaminantes peligrosos en el aire” dictan límites regulatorios específicos para las categorías de fuente que emiten radionucleidos. Esta normativa se divide en distintos subapartados:
 - B: Emisiones de radón de minas subterráneas de uranio
 - H: Emisiones de radionucleidos que no sean de radón en las instalaciones del Department of Energy.
 - I: Emisiones de radionucleidos en instalaciones federales que no sean los de la Nuclear Regulatory Commission y los que no cubre la subparte H
 - K: Emisiones de radionucleidos en plantas de fósforo
 - Q: Emisiones de radón de instalaciones del Department of Energy
 - R: Emisiones de radón de pilas de fosfoyeso
 - T: Emisiones de radón de la eliminación de residuos de tratamiento del uranio
 - W: Emisiones de radón de residuos de tratamiento

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

- **Normativa para el agua potable.** Según la Ley de Agua Potable, la Environmental Protection Agency establece límites legales para los niveles de ciertos radionucleidos en el agua potable.

5.3.4.España

En el caso de España, la legislación aplicable en materia de protección radiológica del medioambiente y las personas surge como transposición de la normativa EURATOM. Esta transposición se adapta al marco legislativo propio de España y hace diferenciaciones atendiendo a la distinta naturaleza de la normativa. A continuación, se enumeran los documentos reguladores fundamentales vigentes en la legislación española diferenciando aquellas regulaciones con rango de ley y las normativas con rango de Real Decreto:

Leyes reguladoras de la protección radiológica de las personas y el medioambiente en España

- Ley 25-1964, de 29 de abril, sobre energía nuclear.
- Ley 15-1980, de 22 de abril, de creación del Consejo de Seguridad Nuclear.
- Ley 12-2011, de 27 de mayo, sobre responsabilidad civil por daños nucleares o producidos por materiales radiactivos.
- Ley 14-1999, de 4 de mayo, de Tasas y Precios Públicos por servicios prestados por el Consejo de Seguridad Nuclear.

Reales Decretos para la regulación de la protección radiológica de las personas y el medioambiente en España

- Real Decreto 102-2014, de 21 de febrero, para la gestión responsable y segura del combustible nuclear gastado y los residuos radiactivos.
- Real Decreto 97-2014, de 14 de febrero, por el que se regulan las operaciones de transporte de mercancías peligrosas por carretera en territorio español.
- Orden IET-1946-2013, de 17 de octubre, por la que se regula la gestión de los residuos generados en las actividades que utilizan materiales que contienen radionucleidos naturales
- Real Decreto 1308-2011, de 26 de septiembre, sobre protección física de las instalaciones y los materiales nucleares, y de las fuentes radiactivas.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

- Real Decreto 1564-2010, de 19 de noviembre, por el que se aprueba la Directriz básica de planificación de protección civil ante el riesgo radiológico.
- Real Decreto 975-2009, de 12 de junio, sobre gestión de los residuos de las industrias extractivas y de protección y rehabilitación del espacio afectado por actividades mineras.
- Real Decreto 298-2009, de 6 de marzo, que modifica el RD 39-1997, que aprueba el Reglamento de los Servicios de Prevención, para promover la mejora de la seguridad y de la salud de las trabajadoras embarazadas, que hayan dado a luz o en lactancia.
- Real Decreto 243-2009, de 27 de febrero, por el que se regula la vigilancia y control de traslados de residuos radioactivos y combustible nuclear gastado entre Estados miembros o procedentes o con destino al exterior de la Comunidad.
- Orden Eco-1449-2003, de 21 de mayo, sobre gestión de materiales residuales sólidos con contenido radiactivo generados en las instalaciones radiactivas de 2ª y 3ª categoría en las que se manipulen o almacenen isótopos radiactivos no encapsulados.
- Real Decreto 783-2001, de 6 de julio, por el que se aprueba el Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes.
- Real Decreto 1836-1999, de 3 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento sobre instalaciones nucleares y radiactivas.
- Real Decreto 413-1997, de 21 de marzo, sobre protección operacional de los trabajadores externos con riesgo de exposición a radiaciones ionizantes por intervención en zona controlada.

5.4. Otras categorías de impacto

Además de las tres categorías de impacto anteriormente analizadas, en el Informe 1 se trataron otra serie de categorías que, aunque su contribución no destaque por encima de las estudiadas, se trata de impactos que ocupan una posición central en la evaluación del impacto medioambiental. En este sentido cabe destacar la transformación del suelo natural, el cambio climático y la destrucción de la capa de ozono.

En cuanto a la transformación del suelo, muchos países como Finlandia, adoptan medidas técnicas que minimizan el movimiento de tierras durante la fase de construcción. Además, todas aquellas edificaciones necesarias para el correcto funcionamiento de la planta estarán

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

correctamente escaladas a la demanda durante la operación. Un ejemplo de esto sería el diseño de las instalaciones hidráulicas [80].

Por otro lado, el cambio climático y la destrucción de la capa de ozono están muy ligados a la emisión de efluentes gaseosos nocivos para el medioambiente. La regulación de cada país establece una serie de límites que restringen las emisiones a cada tipo de industria. En el caso de la industria nuclear, los niveles esperados de este tipo de emisiones son muy bajos. No obstante, como cualquier otra industria han de estar sujetos a la normativa aplicable. En el caso de Chile, existe una regulación en materia de limitación de emisiones en el Decreto 13 del Ministerio del Medioambiente en el que se establece la Norma de Emisión para Centrales Termoeléctricas (2011) [81].

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

6. CONCLUSIONES

Una vez elaborados los objetivos 1 y 2 del Informe 2, que incluyen la caracterización del territorio chileno, así como los efectos de las categorías de impacto estudiadas en el Análisis de Ciclo de Vida, se puede elaborar la siguiente tabla que recoge qué categorías de impacto inciden sobre las variables ambientales analizadas en el objetivo 1. A pesar de que en el apartado 4.2 se hayan estudiado los efectos sobre tres categorías de daño (recursos, ecosistemas y salud humana) de forma conjunta, éstas engloban las variables ambientales descritas en el capítulo 3. Por otro lado, como se muestra en la Tabla 29, el medio es un sistema altamente interrelacionado por lo que una categoría de impacto puede llegar a afectar a más de una variable ambiental de manera indirecta.

Tabla 29. Efectos de las categorías de impacto sobre las variables ambientales estudiadas

Variables ambientales más afectadas								
Categorías de impacto	Clima	Geología y sismología	Suelo	Hidrología	Contaminación atmosférica	Flora y fauna	Demografía	Sector agropecuario
Cambio climático	X			X	X	X	X	X
Destrucción de la capa de ozono	X				X	X	X	X
Acidificación terrestre			X			X		X
Eutrofización del agua				X		X		
Toxicidad humana							X	
Formación fotoquímica de ozono					X	X	X	X
Formación de partículas	X		X		X		X	
Ecotoxicidad terrestre			X	X		X		X
Ecotoxicidad del agua				X		X	X	X
Radiación			X	X	X	X	X	X

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

Variables ambientales más afectadas								
Categorías de impacto	Clima	Geología y sismología	Suelo	Hidrología	Contaminación atmosférica	Flora y fauna	Demografía	Sector agropecuario
Ocupación y transformación del suelo			X			X		X
Disminución de recursos hídricos				X		X	X	X
Disminución de recursos minerales			X			X		
Disminución de recursos fósiles ¹¹	X			X	X	X		X

El estudio de cómo estas categorías de impacto pueden llegar a incidir en el territorio chileno es un proceso que, debido a la evidente diversidad del mismo, debería hacerse de manera particularizada atendiendo a las variables ambientales características de cada zona.

Atendiendo a la categoría de impacto **disminución de recursos minerales**, que es sobre la que más contribución se tiene de acuerdo con los resultados del ACV del Informe 1 la cual corresponde mayoritariamente con la acción de la extracción del uranio, es necesario puntualizar que en un escenario realista la extracción minera se daría en aquellos lugares donde existiese tal recurso, por lo que la elección de este emplazamiento no ofrece un elevado margen de maniobra.

La segunda categoría de impacto sobre la cual se tiene mayor incidencia es la **radiación**, sin embargo, durante la etapa de la operación la influencia de la radiación en el medio y las personas es muy baja gracias a las estrictas regulaciones vigentes en cada país en materia de protección radiológica. En el resto de fases de la vida de la planta y en todas las etapas del ciclo de combustible, los niveles que restringen las emisiones radiactivas también son de aplicación. Además, los avances técnicos tienden a mejorar la tecnología empleada en todas estas fases con el fin de reducir las emisiones radiactivas. No obstante, existen cantidades de radionucleidos que, aunque se emiten de forma controlada, son liberadas al medioambiente. Con el fin de poner en perspectiva cuantitativa los efectos de esta radiación liberada a continuación se realizan varias comparativas con otros sectores que hacen uso de las radiaciones ionizantes [34]:

¹¹ Como consecuencia de la combustión de dichos combustibles fósiles se contribuye al cambio climático por la emisión de gases de efecto invernadero

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

- 3 horas de viaje en avión equivalen a una dosis de 0.01 mSv.
- Fumar 20 cigarrillos al día equivale a 0.36 mSv.
- Una prueba de diagnóstico como una mamografía equivale a 0.42 mSv.
- Inhalación de gas radón presente de forma natural en la atmósfera 2.28 mSv al año.

Teniendo en cuenta que la dosis anual recibida por vivir a 50 millas de una central nuclear es de 0.09 μ Sv [82], el viaje en avión supone unas 110 veces esa dosis, fumar 20 cigarrillos sería 4000 veces dicha dosis y una mamografía se corresponde con 4.500 veces la dosis por vivir cerca de una central nuclear.

La siguiente categoría de impacto es la **ecotoxicidad del agua** la cual hace referencia a la presencia de sustancias que alteran los ecosistemas de los medios hidrológicos. La prevención y las medidas legislativas son herramientas que pueden hacer que esta categoría de impacto pueda verse más regulada, sin embargo, es posible que esta contaminación exista por vertidos residuales o por diversos factores como accidentes o vertidos irregulares llegando a contaminar los medios hídricos. En este caso, la incidencia en el territorio chileno dependerá de las condiciones concretas donde se produzca, si bien es cierto que las calidades de las aguas decrecen de sur a norte, por lo que una primera aproximación podría considerar los medios hídricos del centro y norte.

La categoría de impacto relacionada con la **toxicidad humana** está relacionada con la incidencia en la salud de las sustancias tóxicas detalladas en el apartado b. Por lo tanto, poder ofrecer lugares alejados de núcleos poblados para las actividades descritas es una buena alternativa a la hora de mitigar los efectos en la salud humana. Sin embargo, estos contaminantes pueden verse transportados a otras zonas como consecuencia de la inversión térmica, diferencias de presión atmosférica, vientos y clima, de forma que debería ser un parámetro para considerar si se encuentra el emplazamiento cerca de zonas de elevada población.

En cuanto a la **transformación del suelo**, es necesario atender a los niveles de degradación del suelo de cara a priorizar un emplazamiento frente a otro. Dadas las características del territorio chileno y la variabilidad en el estado de los suelos el efecto de esta categoría de impacto. Teniendo en cuenta que el principal motivo de la degradación de los suelos en Chile es la erosividad y principalmente causada por acción del hombre, resulta conveniente considerar este aspecto a la hora de desarrollar una nueva actividad que requiera procesos de remoción en masa o meteorización de suelos con un elevado grado de erosividad.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

Por último, es importante destacar que, dada la enorme riqueza y diversidad de este territorio las variables ambientales son muy amplias, pero que pueden llegar a verse amenazadas por actividades industriales. De forma que el estudio de los impactos de estas actividades y el estado particularizado del medioambiente de base es una buena práctica de cara a seleccionar aquellos emplazamientos que puedan generar el mínimo impacto posible.

En cuanto al objetivo 3, de acuerdo con el análisis extraído del objetivo 2, las tres categorías de impacto más relevantes en cuanto a su contribución sobre los efectos ambientales son: la disminución de recursos minerales, la ecotoxicidad del agua y la radiación. Las medidas para mitigar la disminución de recursos son, principalmente, de carácter técnico y afectan de manera determinante al ciclo de combustible. Por otro lado, la ecotoxicidad del agua se regula mediante la implantación de BAT que controlan y limitan la emisión de productos potencialmente contaminantes al medio acuático. Asimismo, existe un control sobre la temperatura del agua donde se producen las descargas durante la operación de la central nuclear con el fin de minimizar el impacto sobre el ecosistema. Finalmente, el impacto de la radiación sobre las personas y el medioambiente constituye una de las peculiaridades de la generación nucleoelectrónica que se transmite a la opinión pública como una de las principales preocupaciones. La solución que implanta la industria nuclear desde la legislación de cada país o las recomendaciones emitidas por organismos internacionales con el fin de mitigar el impacto de la radiación sobre las personas y el medioambiente consiste en establecer una serie de límites legales que aplican a todas las fases de la vida de la central nuclear y el ciclo de combustible. El establecimiento de estos límites proviene de normativas internacionales que adoptan de manera común los distintos países por lo que, generalmente, no suelen diferir. Estas medidas están alineadas con los objetivos de la Protección Radiológica de manera que el fin de todas ellas sea garantizar la protección de las personas y el medioambiente frente a los efectos no deseados de las radiaciones ionizantes.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Colegio de Ingenieros de Chile, «Programa de Desarrollo de Centrales Nucleares en Chile, 2009-2030,» Santiago de Chile, 2009.

- [2] Comisión Nacional de Energía, «Consumo eléctrico por Comuna y Tipo de Cliente,» 2015. [En línea]. Available: <http://datos.energiaabierta.cl/dataviews/241686/consumo-electrico-anual-por-comuna-y-tipo-de-cliente/>. [Último acceso: Mayo 2018].

- [3] Dirección Meteorológica de Chile, Subdepartamento de Climatología y Meteorología Aplicada, «Guía Climática Práctica,» Chile, 2008.

- [4] Dirección Meteorológica de Chile, «Climatología,» 2017. [En línea]. Available: <http://www.meteochile.cl/PortalDMC-web/index.xhtml>.

- [5] Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, ODEPA, «Panorama de la Agricultura Chilena,» Chile.

- [6] Centro Sismológico Nacional, «Sismicidad y terremotos en Chile,» 2013. [En línea]. Available: http://www.csn.uchile.cl/wp-content/uploads/2016/06/Terremotos_y_sismicidad_chile.pdf.

- [7] Ministerio de Medio Ambiente de Chile, «Tercer Reporte del Estado del Medio Ambiente en Chile,» 2016.

- [8] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), «Portal de Suelos - Degradación del Suelo,» 2018. [En línea]. Available: <http://www.fao.org/soils-portal/soil-degradation-restoration/es/>.

- [9] «Determinación de la erosión actual y potencial de los suelos de Chile - Centro de información de Recursos Naturales,» 2010.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

- [10] Sistema Nacional de Información Ambiental (SINIA), «Suelos, Desertificación,» [En línea]. Available: <http://ide.mma.gob.cl/>. [Último acceso: Mayo 2018].
- [11] Sistema Nacional de Información Ambiental, «Suelos, Erosividad,» [En línea]. Available: <http://ide.mma.gob.cl/>. [Último acceso: Mayo 2018].
- [12] Universidad de Chile, Instituto de Asuntos Públicos, «Estado del Medio Ambiente en Chile - Comparación 1999 - 2015,» 2016.
- [13] Banco mundial, «Diagnóstico de la gestión de los recursos hídricos,» Chile, 2011.
- [14] Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, «Atlas del Agua, Chile 2016,» Chile, 2016.
- [15] MAPAMA, Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y Medio Natural, «Plan Nacional de calidad del aire y protección de la atmósfera 2013-2016,» España, 2013.
- [16] Ministerio del Medio Ambiente - Gobierno de Chile, «Informe del Estado del Medio Ambiente,» 2016.
- [17] Ministerio del Medio Ambiente, «Quinto Informe Nacional de Biodiversidad de Chile,» Chile, 2014.
- [18] Instituto Nacional de Estadísticas, «Estadísticas Vitales - Anuario 2015,» Chile, 2015.
- [19] Instituto Nacional de Estadísticas (INE) Chile, «Estadísticas agropecuarias, censo agropecuario y forestal,» 2007. [En línea]. Available: <http://www.ine.cl/estadisticas/economicas/estad%C3%ADsticas-agropecuarias>.
- [20] Ruimte en Milieu, Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, «ReCiPe - A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level,» Holanda, 2013.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

- [21] The Hague, Centre for Strategic Studies, «Scarcity of Minerals - A strategic security issue,» The Netherlands, 2009.
- [22] Agencia Europea del Medio Ambiente, «Cambio climático y aire,» 2013. [En línea].
- [23] Program, U.S. Global Change Research, «National Climate Assessment,» 2014. [En línea]. Available: <https://nca2014.globalchange.gov/>.
- [24] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), «Estado Mundial del Recurso del Suelo,» Roma, 2015.
- [25] United States Environmental Protection Agency, «Indicators: Acidification,» 2016. [En línea]. Available: <https://www.epa.gov/national-aquatic-resource-surveys/indicators-acidification>.
- [26] I. Capellán, M. Mediavilla, C. de Castro, Ó. Carpintero y L. J. Miguel, «Agotamiento de los recursos fósiles y escenarios socio-económicos: un enfoque integrado,» Energy, España, 2014.
- [27] Panel Intergubernamental de Cambio Climático, «IPCC - Cambio climático 2014 - Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Resúmenes, preguntas frecuentes y recuadros multicapítulos.,» 2014.
- [28] European Commission, «Nitrates Directive,» 2012-2015.
- [29] N. Essam E. El-Hinnaw. IAEA BULLETIN-VOL.20, Review of the Environmental Impact of Nuclear Energy.
- [30] Occupational Cancer Research Centre, Ontario Uranium Miners Cohort Study Report, 2015.
- [31] «Real Decreto 783/2001, de 6 de julio, por el que se aprueba el Reglamento sobre Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes».

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

- [32] Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), Estimación de las dosis a la población por la exposición debida al funcionamiento de las instalaciones nucleares y radiactivas del ciclo de combustible, y a la radiación natural.
- [33] Nuclear Regulatory Commission, «<https://www.nrc.gov/about-nrc/radiation/around-us/doses-daily-lives.html>,» [En línea].
- [34] The U.S. Department of Energy- Office of Environment, Health, Safety & Security, «https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/09/f33/Radiation_in_Perspective.pdf,» [En línea].
- [35] Foro Nuclear, «<https://www.foronuclear.org/es/el-experto-te-cuenta/119909-que-sabes-de-la-radiacion>,» [En línea].
- [36] A Report Commissioned by UNDP and UNICEF, The Human Consequences of the Chernobyl.
- [37] United Nations Environment Programme, «Pollution endangers both environmental and human health,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.unenvironment.org/news-and-stories/story/world-health-day-pollution-endangers-both-environmental-and-human-health>.
- [38] World Health Organization , «Departamento de Salud Pública, Medio Ambiente y Determinantes Sociales de la Salud,» 2018. [En línea]. Available: http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/health_impacts/es/index7.html.
- [39] The Nature education, «The Sources and Impacts of Tropospheric Particulate Matter,» 2013. [En línea]. Available: <https://www.nature.com/scitable/knowledge/library/the-sources-and-impacts-of-tropospheric-particulate-102760478>.
- [40] Centro Nacional del Medio Ambiente de la Universidad de Chile (CENMA), «Contaminación fotoquímica excedió la norma en un tercio del verano,» Junio 2010.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

- [41] United States Environmental Protection Agency (EPA), «Health and Environmental Effects of Ozone Layer Depletion,» 2016. [En línea]. Available: <https://www.epa.gov/ozone-layer-protection/health-and-environmental-effects-ozone-layer-depletion>.
- [42] S. Cabrera, A. Ipiña, A. Damiani, R. R. Cordero y R. D. Piacentini, «UV index values and trends in Santiago, Chile (33.5°S) based on ground,» *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, n° 115, pp. 73-84, 2012.
- [43] NASA, «Nasa Ozone Watch,» 8 Junio 2018. [En línea]. Available: <https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/>.
- [44] The Groundwater Foundation, «Overuse and depletion,» 2018. [En línea]. Available: <http://www.groundwater.org/get-informed/groundwater/overuse.html>.
- [45] Ministerio de Agricultura - Gobierno de Chile, «Visualizador,» [En línea]. Available: <http://www.dga.cl/limitacionrestriccionagua/Paginas/default.aspx#cuatro>. [Último acceso: Junio 2018].
- [46] Dirección General de Aguas, «Restricciones a los Derechos de agua - Capa vectorial SIG,» [En línea]. Available: http://www.dga.cl/administracionrecursoshidricos/inventario_cuencas_lagos/Paginas/default.aspx. [Último acceso: Junio 2018].
- [47] OECD-NEA, Advanced Nuclear Fuel Cycles and Radioactive Waste Management, 2006.
- [48] Antoine Van de Velde & Friedrich Burtak (Siemens AG / Power Generation Group (KWU), Efficiency improvement of nuclear power plant operation: The significant role of advanced nuclear fuel technologies.
- [49] I. N. Laboratory, Current Comparison of Advanced Nuclear Fuel Cycles (INL/CON-07-12433), 2007.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

[50] IAEA, Spent Fuel Reprocessing Options (IAEA-TECDOC-1587).

[51] IAEA, «<https://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/Technical-Areas/NFC/advanced-fuel-cycles-01-thorium-fuel-cycle.html>,» [En línea].

[52] World Nuclear Association.

[53] Environment Agency (UK), Chemical discharges from nuclear power stations: historical releases and implications for Best Available Technology, 2011.

[54] IAEA, Thermal Discharges at Nuclear Power Stations. Their Management and Environmental Impacts. TECHNICAL REPORTS SERIES No. 155.

[55] IAEA, Chemistry Programme for Water Cooled Nuclear Power Plants. Specific Safety Guide No. SSG-13.

[56] IAEA, Design of the Reactor Coolant System and Associated Systems in Nuclear Power Plants. Safety Guide No. NS-G-1.9..

[57] Environment Agency, Cooling Water Options for the New Generation of Nuclear Power Stations in the UK, 2010.

[58] IAEA, Governmental, Legal and Regulatory Framework for Safety N° GSR Part 1.

[59] IAEA, Radiation Protection and the Safety of Radiation Sources N° GSR Part 3.

[60] IAEA, Safety Assessment for Facilities and Activities No. GSR Part 4.

[61] IAEA, Predisposal Management of Radioactive Waste N° GSR Part 5.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

[62] IAEA, Decommissioning of Facilities No. GSR Part 6.

[63] IAEA, Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency No. GSR Part 7.

[64] IAEA, Radiation Protection of the Public and the Environment No. GSG-8.

[65] IAEA, Radiation Protection Aspects of Design for Nuclear Power Plants NS-G-1.13.

[66] IAEA, Radiation Protection and Radioactive Waste Management in the Operation of Nuclear Power Plants.

[67] IAEA, Occupational Radiation Protection N° RS-G-1.1.

[68] IAEA, Assessment of Occupational Exposure Due to External Sources of Radiation RS-G-1.3.

[69] IAEA, Assessment of Occupational Exposure Due to Intakes of Radionuclides N° RS-G-1.2.

[70] IAEA, Occupational Radiation Protection in the Mining and Processing of Raw Materials RS-G-1.6.

[71] IAEA, Storage of Spent Nuclear Fuel No. SSG-15.

[72] IAEA, Near Surface Disposal Facilities for Radioactive Waste No. SSG-29.

[73] IAEA, Monitoring and Surveillance of Radioactive Waste Disposal Facilities SSG-31.

[74] IAEA, Regulatory Control of Radioactive Discharges to the Environment WS-G-2.3.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

- [75] EURATOM, Directiva 2013-51 EURATOM del Consejo de 22 de octubre de 2013 por la que se establecen requisitos para la protección sanitaria de la población con respecto a las sustancias radiactivas en las aguas destinadas al consumo humano..
- [76] EURATOM, Directiva 2006-117-EURATOM, del Consejo, de 20 de noviembre de 2006, relativa a la vigilancia y al control de los traslados de residuos radiactivos y combustible nuclear gastado.
- [77] EURATOM, Directiva 2011-70-EURATOM, del Consejo, de 19 de julio de 2011, por la que se establece un marco comunitario para la gestión responsable y segura del combustible nuclear gastado y de los residuos radiactivos.
- [78] EURATOM, Directiva 2013-59-EURATOM, del Consejo, de 5 de diciembre de 2013, por la que se establecen normas de seguridad básicas para la protección contra los peligros derivados de la exposición a radiaciones ionizantes, y se derogan otras Directivas.
- [79] EURATOM, RECOMENDACIÓN DE LA COMISIÓN de 18 de diciembre de 2003 relativa a la información normalizada sobre los efluentes radiactivos gaseosos y líquidos vertidos al medio ambiente por las centrales nucleares y las plantas de reelaboración en condiciones de funci.
- [80] Fennovoima, Environmental Impact Assessment Report for a Nuclear Power Plant, 2014.
- [81] Decreto 13 del Ministerio del Medio Ambiente en el que se establece la Norma de Emisión para Centrales Termoeléctricas (2011).
- [82] M. A.S.Hussein, Doses Assessment to the Population in the Environment of a Nuclear Power Plant.
- [83] Comisión Nacional del Medio Ambiente, «Normas Ambientales dictadas bajo la ley de bases del medio ambiente N° 19.300,» 2003.
- [84] Sistema Nacional de Información Ambiental (SINIA), «Riesgos para la salud humana, zona saturada latente,» [En línea]. Available: <http://ide.mma.gob.cl/#>. [Último acceso: Mayo 2018].

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

[85] Sistema Nacional de Información de Fiscalización Ambiental (SNIFA), «Registro de Planes de Prevención y Descontaminación Ambiental,» Superintendencia del Medio Ambiente - Gobierno de Chile, [En línea]. Available: <http://snifa.sma.gob.cl/v2/Instrumento/Tipo/4>.

[86] IAEA, Governmental, Legal and Regulatory Framework for Safety N° GSR Part 1.



IDOM

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 2

En blanco intencionadamente