

# Cálculo de los beneficios ambientales no-atmosféricos derivados de las fuentes de energía renovable

Octubre de 2008

The Pembina Institute



**cec.org**

Este documento de antecedentes fue preparado por The Pembina Institute para el Secretariado de la Comisión para la Cooperación Ambiental. La información contenida es responsabilidad del autor y no necesariamente refleja las opiniones de la CCA o de los gobiernos de Canadá, Estados Unidos o México.

Se permite la reproducción de este material sin previa autorización, siempre y cuando se haga con absoluta precisión, su uso no tenga fines comerciales y se cite debidamente la fuente, con el correspondiente crédito a la Comisión para la Cooperación Ambiental.

A menos que se indique lo contrario, el presente documento está protegido mediante licencia de tipo "Reconocimiento - Sin obra derivada - No comercial", de Creative Commons.



Comisión para la Cooperación Ambiental, 2008

#### Detalles de la publicación

Tipo de publicación: *Documento de antecedentes*

Fecha de publicación: *2 de febrero de 2009*

Idioma original: *Inglés*

Procedimientos de revisión y aseguramiento de la calidad:

Primera revisión de las Partes: noviembre-diciembre de 2008

Registro AC núm. *07.43*

*Available in English*

Para mayor información:

#### **Comisión para la Cooperación Ambiental**

393 rue St-Jacques Ouest, bureau 200

Montreal (Quebec), Canadá, H2Y 1N9

t 514.350.4300 f 514.350.4372

[info@cec.org](mailto:info@cec.org) / [www.cec.org](http://www.cec.org)



# Contenido

<b>1.0</b>	<b>Introducción .....</b>	<b>5</b>
<b>2.0</b>	<b>Metodología básica .....</b>	<b>7</b>
2.1	Efectos en el medio ambiente y la salud de las fuentes de energía convencionales.....	8
2.2	Efectos en el medio ambiente y la salud de las fuentes de energía renovable.....	10
2.3	Comparación de los efectos no-atmosféricos de las fuentes de energía convencionales y las renovables de acuerdo con el costo de la capacidad instalada .....	13
2.3.1	Uso de suelo.....	13
2.3.2	Consumo de agua .....	15
2.3.3	Calidad del agua y descargas .....	16
2.3.4	Residuos sólidos y contaminación del suelo.....	16
2.3.5	Biodiversidad .....	17
<b>3.0</b>	<b>Metodologías más rigurosas.....</b>	<b>19</b>
3.1	Análisis cualitativo comparativo.....	19
3.1.1	Análisis para la toma de decisiones con base en criterios múltiples .....	19
3.2	Cálculos cuantitativos de los efectos ambientales .....	21
3.2.1	Análisis de factores externos .....	21
3.2.2	Evaluación de impacto ambiental.....	22
3.2.3	Evaluación de efectos ecológicos .....	23
3.2.4	Evaluación de riesgo ambiental .....	24
3.3	Evaluación del ciclo de vida .....	25
3.4	Comparación de metodologías.....	27
<b>4.0</b>	<b>Asignación de valores monetarios .....</b>	<b>29</b>
4.1	Valuación de bienes y servicios de los ecosistemas .....	30
4.2	Metodologías de valuación.....	30
<b>5.0</b>	<b>Guía para el cálculo de beneficios .....</b>	<b>34</b>
<b>6.0</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>39</b>
6.1	Conclusiones .....	39
6.2	Recomendaciones.....	40
	<b>Apéndice 1: Cálculo de los efectos de las tecnologías convencionales .....</b>	<b>42</b>
	<b>Apéndice 2: Cálculo de los efectos de las tecnologías renovables .....</b>	<b>47</b>

## **Sobre los autores**

### **Alex Doukas**

Alex es asesor técnico y en políticas dentro del Grupo de Comunidades Sustentables de The Pembina Institute. Antes de incorporarse a The Pembina Institute, trabajó con la Asociación de Energía Sustentable de Ontario (*Ontario Sustainable Energy Association*, OSEA) en el área de educación y formulación de políticas en materia de energía renovable, y ayudó a facilitar la ejecución de proyectos comunitarios de energía eólica y solar. Como colaborador de la OSEA, fue autor de algunos apartados de la Estrategia Nacional de Energía de la Asociación Canadiense de Energía Renovable, entre otros: "Generación distribuida" y "Electricidad comunitaria". También laboró en una compañía dedicada al desarrollo del biogás, con sede en Toronto, para ayudar a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y los residuos destinados a los rellenos sanitarios. Posee una licenciatura en Política y Práctica Ambientales del Centro para el Medio Ambiente de la Universidad de Toronto.

### **Roger Peters**

Roger es ingeniero químico y ambiental, con más de 30 años de experiencia en eficiencia energética y energía renovable. En The Pembina Institute guía el trabajo de la organización en lo relativo a la política nacional de energía renovable y eficiencia energética, y es autor de varios informes sobre mecanismos innovadores para financiar mejoras en la eficiencia energética. También posee vastos conocimientos en cambio climático, pues ha realizado evaluaciones y ofrecido asistencia técnica para promotores de proyectos sobre el uso del Mecanismo de Desarrollo Limpio y otros recursos para el financiamiento del carbono. Cuenta con una amplia experiencia internacional en Asia, América Latina y África, en proyectos sobre eficiencia energética y energía rural financiados por el Banco Mundial, el Fondo para el Medio Ambiente Mundial y la Agencia Canadiense para el Desarrollo Internacional (ACDI).

### **Agradecimientos**

Los autores agradecen la asesoría y las contribuciones de Mike Kennedy y Amy Taylor sobre el tema de la valuación monetaria de los beneficios ambientales, así como la revisión técnica de Tim Weis.

# 1.0 Introducción

El proyecto sobre energía renovable de la Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA) del TLCAN se estableció con objeto de mejorar la coordinación regional y nacional, así como fomentar la coherencia de las políticas en materia de energía renovable. A fin de asegurar un entorno propicio para el crecimiento del mercado de la energía renovable, el proyecto de la CCA abarca aspectos tanto técnicos como de política. Las distintas tareas que lo conforman se apoyan entre sí y están encaminadas a brindar a los promotores de proyectos, inversionistas, responsables de las decisiones y otros interesados información para contribuir a aumentar el uso de energía renovable. El Comité de Expertos en Energía Renovable (CEER) ofrece asesoría técnica al Consejo y el Secretariado conforme se emprenden las tareas.

Como parte de su tarea para *desarrollar capacidades para calcular los beneficios ambientales de la energía renovable*, la CCA está elaborando herramientas con las cuales calcular los beneficios derivados de la energía renovable en proyectos relacionados con diferentes modalidades de esta energía.

A menudo se recurre a las fuentes de energía renovable por su grado mínimo de emisiones atmosféricas y de gases de efecto invernadero a escala tanto local como global. En el presente informe se documentan otros beneficios ambientales no-atmosféricos de la energía renovable, relacionados por ejemplo con uso de suelo, agua y salud; se describen los métodos aplicados para identificar y calcular estos beneficios, y también se señalan las deficiencias en su cuantificación. Centrado en las fuentes de energía renovable para generación eléctrica, este informe complementa el trabajo de la CCA sobre beneficios en materia de emisiones atmosféricas y de gases de efecto invernadero.

Los beneficios para el medio ambiente y la salud derivados de las fuentes de energía renovable se relacionan sobre todo con los efectos nocivos del uso de fuentes de energía convencional que se evitan (acaso ajustados en función de posibles efectos negativos para el medio ambiente o la salud ocasionados por la propia fuente de energía renovable, cuando los hay). Por consiguiente, las metodologías para calcular estos beneficios incluyen una comparación de efectos entre las fuentes de energía renovable y las de energía convencional a las que más probablemente reemplacen.

En este estudio se evalúan diferentes metodologías para comparar fuentes de energía renovable y convencional de acuerdo con varios criterios, por ejemplo:

- Aceptación de los grupos interesados
- Alcance y duración de uso
- Facilidad de uso
- Accesibilidad de datos de entrada

También se ofrece una guía paso a paso para calcular los beneficios de proyectos de generación de energía renovable considerados individualmente.

Se abordan las siguientes fuentes de energía renovable:

- Eólica
- Solar (fotovoltaica y termoeléctrica)
- Biomasa (sin contar la combustión de desechos sólidos o de aguas residuales, madera con carga de sal, lodos de destintado y licor negro de la industria papelera, clasificados como residuos y fuentes de energía no renovables)
- Biogás obtenido de desechos animales o aguas residuales

- Hidroelectricidad (con embalse)
- Hidroelectricidad (desde el cauce de un río)
- Mareomotriz y del oleaje
- Geotérmica

Las fuentes de energía renovable incluidas en el estudio benefician las siguientes categorías ambientales y de salud:

- Suelo
- Consumo de agua
- Calidad del agua y descargas
- Residuos sólidos y contaminación de aguas freáticas (incluida la contaminación por radiación)
- Biodiversidad

El informe consta de seis apartados. Luego de la introducción, en el segundo apartado se identifica la diversidad de efectos no-atmosféricos para el medio ambiente y la salud derivados de las fuentes de energía renovable y convencional. Los efectos se clasifican como nulos, bajos, moderados y altos. Se presentan medidas cuantitativas siempre que se dispone de ellas, y se identifican las deficiencias en datos e información. Con los resultados se comparan las fuentes renovables y las convencionales en cada categoría de beneficio, lo que arroja un método básico para calcular los beneficios no-atmosféricos de la energía renovable.

Los ciclos de combustible de todas las fuentes de energía estudiadas incluyen la explotación del recurso energético, su producción y procesamiento; la generación eléctrica, y la eliminación de residuos. Queda excluida la fabricación de generadores eléctricos.

En el tercer apartado se examinan metodologías más rigurosas que pueden utilizarse para comparar los efectos de las diferentes fuentes de energía en el medio ambiente y la salud. Se dan ejemplos de cómo estas metodologías se han usado para el cálculo de beneficios no-atmosféricos y se identifican las deficiencias metodológicas. Las metodologías en sí se dividen en tres categorías:

- Análisis cualitativo comparativo
- Comparación de los datos cuantitativos arrojados por los efectos ambientales
- Análisis del ciclo de vida

En el cuarto apartado se describen las metodologías para asignar un valor monetario a los beneficios o efectos identificados, y en el quinto se incluye una guía para calcular, con base en el análisis realizado en los apartados anteriores, los beneficios no-atmosféricos de las fuentes renovables. Por último, se presentan las conclusiones del estudio, así como recomendaciones para el trabajo a futuro.

## 2.0 Metodología básica

En este apartado se identifican los posibles efectos ambientales no-atmosféricos de los sistemas de generación de electricidad basados en la energía convencional y en la renovable. La magnitud relativa de cada tipo de efecto se calcula según la tecnología de generación y se evalúan los beneficios comparativos de las fuentes de energía renovable. De este modo contamos con un método básico para calcular los beneficios de las fuentes de energía renovable.

Se utilizan los siguientes parámetros para evaluar las cinco categorías de beneficios:

### **Suelo:**

- Superficie total (suelo utilizado)
- Huella (área) del equipo y las instalaciones
- Influencia en suelos adyacentes
- Grado de usos concurrentes
- Efectos a largo plazo posteriores al cierre de centrales
- Efecto visual

### **Consumo de agua:**

- Volumen total usado
- Uso consuntivo
- Efecto en los niveles de agua y otros usos del agua

### **Calidad del agua y descargas:**

- Efectos térmicos
- Descargas tóxicas o radiactivas o cambios de calidad
- Nivel de acidez en las descargas
- Sedimentación

### **Residuos sólidos y contaminación del suelo (incluida la radiación):**

- Residuos mineros contaminados
- Escoria u otros residuos sólidos
- Duración del efecto tras el cierre de centrales

### **Biodiversidad:**

- Alteración o contaminación de hábitats y tránsito de especies
- Efecto en especies indígenas, raras o amenazadas
- Introducción de especies exóticas o plagas
- Efecto en suelos y especies vecinos

## 2.1 Efectos en el medio ambiente y la salud de las fuentes de energía convencionales

Los efectos negativos en el medio ambiente y la salud de las fuentes de energía convencionales están bien documentados, aunque existen pocas mediciones cuantitativas de los mismos. En el cuadro 1 se presenta un resumen de los efectos no-atmosféricos de las tres fuentes de energía convencionales: carbón, gas natural y energía nuclear. En el apéndice 1 se ofrece un análisis más amplio de estos efectos. La severidad relativa (alta, moderada, baja) de los efectos ambientales mostrados en el cuadro siguiente se basa en un documento general preparado por el Proyecto de Políticas en materia de Energía Renovable de Estados Unidos<sup>1</sup> y se complementa con información adicional incluida en el apéndice 1. Se dan mediciones cuantitativas siempre que éstas se encuentran disponibles.

Cabe señalar que los efectos pueden variar en gran medida, dependiendo de las características ambientales regionales y las consideraciones específicas de cada proyecto, como ubicación, tipo de terreno afectado y características ecológicas locales.

**Cuadro 1: Posibles efectos ambientales no-atmosféricos de diversas fuentes de energía convencional**

Fuente de energía	Uso de suelo	Consumo de agua	Calidad del agua y descargas	Residuos sólidos y contaminación del suelo	Biodiversidad
<b>Carbón</b>	<p><b>Alto:</b></p> <p>Suelo afectado por la minería. La minería a cielo abierto ocasiona cambios permanentes en grandes extensiones de suelo.</p> <p>Efectos físicos directos de la generación, excluidos los de la minería energética, que según cálculos representa aproximadamente 5 ha/MW de capacidad.</p> <p>Disposición de ceniza residual 0.4 ha/MW de capacidad instalada.</p>	<p><b>Alto:</b></p> <p>Uso de agua para el lavado de combustibles, enfriamiento de centrales eléctricas y procesamiento de escoria. Un uso elevado de agua puede afectar los niveles de agua en los cuerpos de donde se extrae.</p>	<p><b>Moderado:</b></p> <p>Las descargas de la minería, el procesamiento y almacenamiento de combustibles, y el procesamiento de escoria contienen metales y toxinas (arsénico, plomo, mercurio, etc.); la escorrentía ácida de las minas puede tener efectos considerables.</p> <p><b>Alto:</b></p> <p>Contaminación térmica derivada de los sistemas de enfriamiento.</p>	<p><b>Alto:</b></p> <p>Se producen cantidades considerables de residuos tóxicos de la minería y desechos de la generación eléctrica, que contienen toxinas, óxidos metálicos, álcalis, etcétera.</p> <p>Volumen de desechos ~10% del combustible utilizado.</p> <p><b>Bajo:</b></p> <p>Radionucleidos en residuos sólidos.</p>	<p><b>Alto:</b></p> <p>Destrucción de hábitats y muerte de peces y mamíferos a causa de la escorrentía ácida de las minas, la contaminación térmica y la deposición de nitrógeno. Eliminación de la mayoría de las especies en zonas mineras y repercusiones en suelos aledaños. Efectos en el hábitat durante todo el ciclo del combustible.</p>

<sup>1</sup> Adam Serchuk, "The Environmental Imperative for Renewable Energy: an Update", *Renewable Energy Policy Project Special Earth Day Report*, Washington, DC, 2000. Disponible en línea, en: <[www.repp.org/repp\\_pubs/pdf/issuebr1.pdf](http://www.repp.org/repp_pubs/pdf/issuebr1.pdf)> y <[www.repp.org/repp\\_pubs/articles/envImp/earthday.exec.summ.pdf](http://www.repp.org/repp_pubs/articles/envImp/earthday.exec.summ.pdf)>.

Fuente de energía	Uso de suelo	Consumo de agua	Calidad del agua y descargas	Residuos sólidos y contaminación del suelo	Biodiversidad
<b>Gas natural</b>	<p><b>Moderado:</b></p> <p>Perforación y acceso por ductos a terrenos privados. La formación de gases ácidos afecta el uso de los suelos aledaños. Los caminos para la extracción de gas pueden causar erosión local y afectar otros usos de suelo.</p>	<p><b>Bajo:</b></p> <p>Una mayor distribución de centrales más pequeñas representa un menor consumo local de agua.</p> <p>Mayores requerimientos de agua de enfriamiento en el caso de generación de ciclo combinado.</p>	<p><b>Nulo a moderado:</b></p> <p>Depende de la fuente de gas; la extracción tradicional tiene un efecto reducido en la calidad del agua.</p> <p><b>Alto:</b></p> <p>La extracción de metano en yacimientos de carbón puede tener efectos considerables en la calidad del agua.</p>	<p><b>Bajo:</b></p> <p>Afectación derivada de la exploración y perforación.</p>	<p><b>Bajo:</b></p> <p>Afectación de los hábitats locales durante la exploración y extracción.</p> <p>Riesgo de fragmentación de los hábitats a causa de los ductos.</p>
<b>Energía nuclear</b>	<p><b>Moderado:</b></p> <p>La minería de uranio, el procesamiento de combustibles, la generación eléctrica y la eliminación de residuos imposibilitan el uso del suelo para cualquier otro propósito por periodos muy prolongados.</p> <p>Utilización total del suelo entre 0.1 y 0.4 ha/MW.</p>	<p><b>Alto:</b></p> <p>Se requieren grandes volúmenes locales de agua para enfriamiento y aumentan las temperaturas de los cuerpos de agua, lo que ocasiona contaminación térmica.</p>	<p><b>Alto:</b></p> <p>Contaminación de aguas freáticas con aguas residuales tóxicas (ácidas y radiactivas).</p> <p>Emisiones rutinarias menores de radionucleidos y metales pesados en aguas superficiales y freáticas durante la generación eléctrica.</p>	<p><b>Alto:</b></p> <p>Escoria y residuos de roca ácidos y radiactivos.</p> <p>Ensamblados de combustible radiactivo usados y de larga duración. Grandes cantidades de residuos sólidos con bajos niveles de radiactividad.</p> <p>Alto costo de cierre de las centrales.</p>	<p><b>Moderado:</b></p> <p>Efectos de los residuos y descargas tóxicos y radiactivos en suelos y especies acuáticas locales durante las actividades mineras y la generación eléctrica.</p> <p><b>Alto:</b></p> <p>Efectos genéticos indeterminados a largo plazo.</p>

## 2.2 Efectos en el medio ambiente y la salud de las fuentes de energía renovable

Los posibles efectos en el medio ambiente y la salud vinculados con las fuentes de energía renovable se han identificado en diversos estudios. Programas como Eco-Logo, que certifica varios tipos de productos de electricidad renovable, y la Asociación Internacional de Energía Hidroeléctrica, que ha formulado directrices para centrales hidroeléctricas con embalse, también han identificado posibles efectos. En el cuadro 2 se presenta un resumen de los efectos no-atmosféricos negativos por fuente de energía renovable. En el apéndice 2 se incluye un análisis más detallado. No se hallaron fuentes de información pertinentes con una descripción de los efectos ambientales de los sistemas de generación eléctrica a partir del biogás, la energía mareomotriz o el oleaje.

Al igual que ocurre con los efectos ocasionados por las fuentes de energía convencionales, la severidad relativa de los efectos ambientales que aparecen en el cuadro 2 se basan en los estudiados por el Proyecto de Políticas en Materia de Energía Renovable,<sup>2</sup> complementados por las fuentes de información enumeradas en el apéndice 2. Cuando están disponibles, se ofrecen mediciones cuantitativas de los efectos.

De igual modo, cabe señalar que los efectos pueden variar en gran medida, dependiendo de las características ambientales regionales y las consideraciones específicas de cada proyecto.

**Cuadro 2: Posibles efectos ambientales no-atmosféricos de las fuentes de energía renovable**

Fuente de energía	Uso de suelo	Consumo de agua	Calidad del agua y descargas	Residuos sólidos y contaminación del suelo	Biodiversidad
<b>Hidro-electricidad con embalse</b>	<b>Alto:</b> Las presas y embalses eliminan los usos de suelo prevalentes al momento de su construcción. Sin embargo, hay otros usos concurrentes que se pueden derivar de la creación de un embalse.	<b>Moderado:</b> Cambios en el flujo natural del agua. Evaporación del embalse.	<b>Moderado:</b> Cambios en la temperatura y la calidad del agua (por ejemplo, presencia de mercurio; la contaminación por mercurio a menudo es temporal, pero aun así posiblemente dañina). Sedimentación en el embalse.	<b>Moderado:</b> Reducción en el flujo de nutrientes corriente abajo. Mayor erosión corriente abajo, así como ríos o estuarios derivados de la modificación.	<b>Moderado:</b> Posible alteración del hábitat de los peces y su tránsito. Efecto en especies autóctonas, raras o amenazadas. La alteración del flujo puede aumentar la propagación de especies exóticas o plagas. Efecto en la biodiversidad corriente abajo.
<b>Hidro-electricidad desde el cauce de un río</b>	<b>Bajo:</b> Efecto menor derivado de la desviación de corrientes.	<b>Bajo:</b> Reducciones en flujos de agua natural en las áreas circunvaladas.	<b>Nulo</b>	<b>Nulo</b>	<b>Bajo:</b> Afectación del hábitat de los peces y de especies autóctonas en el área circunvalada.

<sup>2</sup> *Ibid.*

Fuente de energía	Uso de suelo	Consumo de agua	Calidad del agua y descargas	Residuos sólidos y contaminación del suelo	Biodiversidad
<b>Sistemas solares foto-voltaicos y térmicos</b>	<p><b>Alto:</b></p> <p>Los proyectos en terrenos no contaminados ocupan superficies considerables, pero tienen efectos benignos en los suelos adyacentes.</p> <p>Las celdas solares fotovoltaicas requieren aproximadamente 4.5 ha/MW; la energía solar térmica, 2-3 ha/MW.</p> <p><b>Nulo o bajo:</b></p> <p>No hay efectos en el suelo si los paneles se ubican en edificios u otras estructuras montadas en suelos utilizados para otras actividades (por ejemplo, estacionamientos).</p>	<p><b>Nulo:</b></p> <p>En el caso de sistemas fotovoltaicos.</p> <p><b>Bajo:</b></p> <p>Demanda de agua de enfriamiento en el caso de sistemas solares térmicos.</p>	<p><b>Bajo:</b></p> <p>Los sistemas fotovoltaicos pueden entrañar el uso de sustancias peligrosas o tóxicas para la generación. La mayoría de los materiales tóxicos se encuentran en sistemas cerrados durante el proceso de manufactura, lo que reduce el riesgo de contaminación.</p> <p><b>Bajo:</b></p> <p>Posible derrame de fluido de transferencia de calor en los sistemas solares térmicos.</p>	<p><b>Nulo</b></p>	<p><b>Nulo</b></p>
<b>Eólica</b>	<p><b>Moderado:</b></p> <p>Los sistemas eólicos ocupan una superficie considerable, pero tanto en tierra como costa afuera permiten un uso concomitante para actividades rurales, agrícolas o marinas, incluida la irrigación tipo pivote.</p> <p>Ocupación total de suelo de 5-30 ha/MW, dependiendo del diseño del proyecto.</p> <p>5-10% de esa superficie normalmente está ocupada por turbinas.</p> <p>Ruido para los residentes locales si la distancia entre las turbinas instaladas y las zonas habitadas no es suficiente.</p> <p>El efecto visual puede ser importante. Puede</p>	<p><b>Nulo</b></p>	<p><b>Nulo</b></p>	<p><b>Bajo:</b></p> <p>Afectación temporal durante la construcción.</p>	<p><b>Bajo:</b></p> <p>Afectación menor para los ecosistemas de aves y locales dependiendo de la ubicación; puede haber efectos importantes si los proyectos están mal ubicados.</p> <p>No se conocen bien los efectos que el ruido puede tener.</p> <p>Riesgo de fragmentación de los hábitats y efectos en los corredores migratorios. Los caminos de acceso también pueden contribuir a la fragmentación de los hábitats.</p>

Fuente de energía	Uso de suelo	Consumo de agua	Calidad del agua y descargas	Residuos sólidos y contaminación del suelo	Biodiversidad
	<p>generarse erosión como consecuencia de los caminos de acceso, dependiendo de la ubicación y las características geológicas.</p> <p>Las turbinas se pueden desmontar si se decide concluir el proyecto y la zona puede retornar a su condición casi original.</p>				
<b>Geotérmica</b>	<p><b>Bajo:</b></p> <p>Sólo en la ubicación de la central.</p> <p>3 ha/MW en total.</p> <p>0.5-1 ha/MW de la instalación.</p>	<b>Nulo</b>	<p><b>Bajo:</b></p> <p>Posibilidad de aguas residuales tóxicas si la fuente contiene minerales o azufre.</p>	<b>Nulo</b>	<p><b>Bajo:</b></p> <p>Posible efecto local en zonas montañosas.</p>
<b>Mareomotriz y oleaje</b>	<p><b>Bajo:</b></p> <p>Algunas afectaciones en el suelo a causa de la conexión de los sistemas de energía mareomotriz y del oleaje a la red de suministro eléctrico.</p>	<b>Nulo</b>	<b>Nulo</b>	<b>Nulo</b>	<p><b>Bajo:</b></p> <p>Alteración local del hábitat en ecosistemas donde tiende a haber un buen oleaje.</p>
<b>Biomasa</b>	<p><b>Alto:</b></p> <p>Competencia con suelos usados para producción de alimentos o medicamentos, y suministro de energía local o materiales de construcción. Varía mucho dependiendo de la materia prima.</p> <p>100-400 ha/MW.</p> <p><b>Bajo:</b></p> <p>Efecto reducido si se usan desechos agrícolas, forestales o del procesamiento de alimentos.</p>	<p><b>Moderado:</b></p> <p>Agua usada para procesamiento de combustibles y enfriamiento en centrales eléctricas.</p> <p>A menor capacidad, menor efecto local.</p>	<p><b>Moderado:</b></p> <p>Escorrentía de fertilizantes y plaguicidas.</p>	<p><b>Bajo:</b></p> <p>Eliminación de cenizas no tóxicas. Residuos ~2% del combustible utilizado.</p>	<p><b>Alto:</b></p> <p>Efecto en áreas protegidas o ecosistemas valiosos. Extracción no sustentable.</p> <p>Menor retorno de materia orgánica al suelo.</p>

## 2.3 Comparación de los efectos no-atmosféricos de las fuentes de energía convencionales y las renovables de acuerdo con el costo de la capacidad instalada

Al comparar los efectos de las fuentes de energía convencionales con los de las fuentes renovables en cada una de las cinco categorías de efectos (descritas en los cuadros 1 y 2), podemos hacer un cálculo básico de los beneficios no-atmosféricos de las fuentes renovables. Por ejemplo, las necesidades de uso de suelo para la adquisición y generación eléctrica a partir de energía nuclear y carbón son relativamente reducidas en comparación con la energía eólica y la solar para la misma generación eléctrica; sin embargo, a diferencia de lo que ocurre con estos dos últimos tipos de energía, en los casos de generación nuclear o por carbón estos terrenos no se pueden usar para otros fines y a menudo están contaminados. Por consiguiente, los beneficios en uso del suelo para la energía eólica y solar se relacionan con los aprovechamientos múltiples que se le pueden dar al suelo sin ocasionar efectos negativos.

Las centrales eléctricas basadas en energía renovable más comunes son más pequeñas que las centrales eléctricas convencionales y suelen operar con diferentes factores de capacidad. Por ello es necesario comparar los efectos de cualquier sistema eléctrico basado en energía renovable con los de una fuente de energía convencional con capacidades equivalentes.<sup>3</sup> Por ejemplo, un proyecto de energía eólica de 100 MW con un factor de capacidad de 36 por ciento equivaldría a 50 MW de capacidad nuclear con un factor de 72 por ciento,<sup>4</sup> y 43 MW de capacidad de carbón con un factor de 85 por ciento.

Con base en los efectos señalados en los cuadros 1 y 2, en los siguientes subapartados se presenta un análisis básico de alto nivel sobre los efectos en uso del suelo, consumo de agua, calidad del agua, residuos sólidos y beneficios para la biodiversidad derivados de las fuentes de energía renovable. Para mayor información sobre las fuentes usadas, consúltense los apéndices 1 y 2.

Más adelante, en el apartado 3, se describe un método más riguroso con el cual calcular estos beneficios y compararlos entre sí.

### 2.3.1 Uso de suelo

#### Superficie total (suelo utilizado) y huella (área) del equipo y las instalaciones

Los cálculos basados en los proyectos en operación indican que si bien que las instalaciones eólicas ocupan entre 5 y 30 ha por MW, dependiendo del diseño del proyecto, sólo de 5 a 10 por ciento de esa superficie suele estar ocupada por turbinas. De acuerdo con el Laboratorio Nacional de Energía Renovable (*National Renewable Energy Lab*) de Estados Unidos, el terreno realmente necesario para las turbinas eólicas oscila entre 0.1 y 0.2 ha por turbina. En zonas rurales, el resto de la superficie a menudo puede aprovecharse para usos que no entren en conflicto, como pastoreo e irrigación.

La Comisión de Desarrollo Sustentable ha comparado la superficie no disponible para otros propósitos entre instalaciones eólicas y nucleares.<sup>5</sup> Según sus cálculos, el terreno utilizado para una central nuclear va

---

<sup>3</sup> Partimos del supuesto de que, en el futuro, las centrales basadas en energía renovable que incorporen sistemas de almacenamiento de energía —por ejemplo, almacenamiento bombeado o baterías avanzadas— podrán desplazar a las centrales convencionales de mayor tamaño.

<sup>4</sup> Factor de capacidad típico de centrales nucleares ubicadas en Ontario, considerando interrupciones del suministro eléctrico no programadas y reparaciones.

<sup>5</sup> Comisión de Desarrollo Sustentable, *The Role of Nuclear Power in a Low Carbon Economy*, Paper 3: Landscape, Environment and Community Impacts of Nuclear Power, 2006. Disponible en línea, en: <[www.sd-commission.org.uk/publications/downloads/Nuclear-paper3-landscapeEnvironmentCommunity.pdf](http://www.sd-commission.org.uk/publications/downloads/Nuclear-paper3-landscapeEnvironmentCommunity.pdf)> (consulta realizada en noviembre de 2007).

de 0.1 a 0.4 ha/MW, mientras que el utilizado para una instalación de energía eólica en tierra es de alrededor de 0.18 ha/MW, puesto que sólo una pequeña porción de la superficie total ocupada por una instalación de energía eólica es en realidad suelo afectado no útil para otros fines. Partiendo del supuesto, como ya se mencionó, de que el factor de capacidad de una central nuclear es normalmente de 72 por ciento, más o menos el doble del de una instalación de energía eólica, las áreas reales no disponibles para otros fines por unidad de producción de electricidad resultan bastante similares.

Las instalaciones solares fotovoltaicas requieren aproximadamente 3.5 ha/MW, en tanto que las tecnologías de generación eléctrica por medio de energía solar térmica pueden requerir solamente de 1.3 a 2 ha/MW. Considerando un factor de capacidad de 20 por ciento para la energía solar, esto se eleva a 5-10 ha/MW si se compara con el factor de capacidad nuclear de 72 por ciento. No obstante, cuando los sistemas fotovoltaicos están instalados en la envoltura de los edificios ya construidos, no se produce un efecto progresivo en el suelo utilizado.

El carbón produce una huella en el uso de suelo bastante mayor que la energía nuclear o la eólica, pero potencialmente menor que los sistemas solares fotovoltaicos emplazados en terrenos no contaminados cuando se tienen en cuenta sólo los efectos directos (es decir, los efectos en el uso de suelo para propósitos ajenos a la minería) y los factores de capacidad.<sup>6</sup> Dar cuenta de los efectos de las diferentes fuentes de energía relacionados con el suelo depende, en gran medida, de los supuestos utilizados para calcular el uso total del suelo. Este problema se ejemplifica mediante los diversos cálculos de los requisitos de uso de suelo para la generación de energía solar en una sola jurisdicción de América del Norte: Ontario. En un informe de la organización no lucrativa Pollution Probe de Ontario se calculan en torno de 20 km<sup>2</sup> por 1,000 GWh de energía solar; la Asociación Canadiense de Industrias Solares (*Canadian Solar Industries Association*) calcula aproximadamente 5.1 km<sup>2</sup> por 1,000 GWh, en tanto que la Dirección de Energía Eléctrica de Ontario (*Ontario Power Authority*) considera un valor de 1 km<sup>2</sup> por 1,000 GWh de energía solar. Siempre que sea posible, los sectores interesados deben llegar a algún acuerdo sobre valores apropiados para supuestos como el uso de suelo a fin de asegurar que la evaluación de los efectos arroje resultados aceptables para la mayoría de las partes.

La electricidad obtenida de cauces de río, biogás, gas natural y energía geotérmica produce la menor huella en relación con el uso de suelo. En este sentido, la huella de la hidroelectricidad con embalse depende en gran medida del emplazamiento (hondura del valle). Sin embargo, en la mayoría de los casos el área inundada se puede usar para otros fines —por ejemplo, recreativos— siempre que se tome el cuidado de clarear el terreno antes de inundar. El uso de suelo relacionado con la electricidad derivada de biomasa también varía mucho dependiendo de la materia prima y el proceso de generación eléctrica.

### **Influencia en suelos adyacentes**

La minería de carbón y uranio, así como la generación carboeléctrica y nuclear producen un efecto importante en los usos del suelo adyacente al área utilizada.

### **Grado de usos concurrentes**

Como ya se señaló, cuando comparamos los efectos en el uso del suelo derivados de las diferentes fuentes de energía, conviene diferenciar entre la superficie total afectada y el área del suelo que no estará disponible para usos alternativos. Por ejemplo, en comparación con el ciclo del combustible de la energía

---

<sup>6</sup> Para generar 6 TWh durante 30 años, la energía carboeléctrica requiere entre 873 y 1,473 ha, mientras que la energía eólica requiere 318 ha. Véase Paul Gipe, *Wind Energy Comes of Age*, John Wiley & Sons, Inc., Toronto, 1995, p. 395.

carboeléctrica, la eólica, solar, mareomotriz y del oleaje ocupan una superficie mucho mayor en tierra (o agua), pero en muchos casos esa área se puede aprovechar para otros fines, mientras que los terrenos usados para la minería de carbón o para la eliminación de cenizas o escoria no se puede usar para su propósito original ni para ningún otro.

### **Efectos y uso a largo plazo luego del cierre de centrales**

Aunque su huella es menor que las superficies utilizadas para la generación eléctrica a partir de fuentes de energía renovable, el suelo afectado por la minería de carbón o uranio y el usado para la eliminación de residuos nucleares o escoria no se puede aprovechar para ningún otro propósito.

### **Efecto visual**

El efecto visual de una fuente de energía depende de toda la superficie ocupada y no sólo de donde se encuentra el equipo. Por ende, la energía eólica ocasiona el mayor efecto físico en el paisaje por unidad de generación eléctrica. Aunque los sistemas de energía solar ocupan un área mayor que los de energía eólica por unidad de generación, los colectores o paneles solares se encuentran a ras del suelo y, por tanto, son menos obvios.

En conclusión, las fuentes de energía renovable tienden a tener efectos mucho mayores pero más benignos en el uso de suelo que la minería de carbón y uranio, la producción de combustibles y la generación eléctrica. Una mayor extensión de terreno resulta afectado por unidad de energía eléctrica y el efecto visual es importante, pero el nivel de contaminación y el efecto a largo plazo en el suelo es mucho menor.

## **2.3.2 Consumo de agua**

Las fuentes de energía renovable no térmicas, como la energía solar fotovoltaica, hidroeléctrica, mareomotriz o del oleaje, no consumen agua para generar electricidad. La falta de medidas cuantitativas de consumo de agua por MW o GWh para las fuentes de energía convencional dificulta las comparaciones. Las siguientes observaciones se basan en los escasos datos disponibles.

Toda central termoeléctrica que produce vapor para generar electricidad cuenta con un sistema de enfriamiento por medio de agua que depende de la presión del vapor y el consumo específico del generador. Por consiguiente, los generadores termoeléctricos renovables como los sistemas solares térmicos y la combustión de biomasa usan volúmenes de agua de enfriamiento similares a los de las centrales convencionales carboeléctricas, de ciclo combinado de gas natural y nucleares con la misma capacidad y consumo específico. Sin embargo, los generadores de energía renovable tienden a ser de menores dimensiones y a tener una distribución más amplia, por lo que en zonas donde escasea el agua para enfriamiento podrían tener un menor efecto en los recursos hídricos locales.

La minería y el procesamiento de carbón y uranio requieren el uso de agua, una parte de la cual se destina habitualmente al uso consuntivo.

Hay evaporación en las centrales hidroeléctricas con embalse, pero probablemente sea menor por GWh que el consumo de agua de enfriamiento necesario en centrales térmicas.

Por tanto, en términos generales, las fuentes de energía renovable ofrecen el beneficio de un consumo nulo o bajo de agua local en comparación con las centrales convencionales.

### **2.3.3 Calidad del agua y descargas**

No se hallaron medidas de cuantificación para los efectos en la calidad del agua de los sistemas de generación eléctrica renovables o convencionales que permitieran hacer un cálculo cuantitativo de los beneficios de las fuentes de energía renovable. No obstante, de la información disponible se desprenden las siguientes observaciones.

Los contaminantes y los fuertes cambios en la temperatura del agua ocasionan efectos negativos en la calidad del agua. Los sistemas de enfriamiento para las centrales termoeléctricas de gran tamaño como las carboeléctricas, las de ciclo combinado de gas natural y las nucleares pueden tener importantes efectos adversos en la temperatura del agua local. Algunas centrales son responsables de la muerte de más de un millón de peces por año de operación en gran medida a causa del aumento de la temperatura del agua. Las centrales de gas natural y térmicas a base de biogás y biomasa, más pequeñas y distribuidas, tendrán menores repercusiones locales en la temperatura del agua siempre y cuando se ubiquen en cuerpos de agua de tamaño similar.

Las descargas de la minería de carbón, así como del procesamiento de combustibles y escoria pueden contener metales y toxinas (arsénico, plomo, mercurio, etcétera). Por su parte, la minería de uranio puede contaminar las aguas freáticas con aguas residuales tóxicas (ácidas y radiactivas) de la minería. Durante la generación eléctrica, las centrales nucleares también emiten rutinariamente cantidades menores de radionucleidos a la superficie y las aguas freáticas por medio del agua de enfriamiento.

En general, las fuentes de energía renovable como la eólica y la solar no producen descargas de agua contaminada y, por ende, ofrecen beneficios considerables en comparación con el uso de carbón y energía nuclear.

Las instalaciones hidroeléctricas con embalse pueden tener efectos nocivos en la temperatura del agua, aunque normalmente las fluctuaciones de temperatura en este caso son mucho menos severas que las ocasionadas por los sistemas de enfriamiento en las centrales termoeléctricas. Además, las centrales hidroeléctricas también pueden provocar mayores concentraciones de mercurio en el agua, pues los suelos y las rocas inundados que contienen mercurio lo liberan en el agua. Asimismo, los sistemas hidroeléctricos con embalse pueden ocasionar el depósito de cantidades considerables de sedimentos en el embalse, lo que puede tener efectos de severidad diversa en la calidad y la acidez del agua si no se tratan apropiadamente.

Las fuentes geotérmicas pueden presentar un alto contenido de minerales o ácidos.

Los efectos en la calidad del agua de los cultivos para obtener combustible de biomasa son bajos siempre y cuando la escorrentía de fertilizantes y plaguicidas se minimice o se apliquen prácticas de cultivo orgánicas o ecológicamente adecuadas.

### **2.3.4 Residuos sólidos y contaminación del suelo**

Como ocurre con otros tipos de beneficios, hay muy pocas mediciones para cuantificar los efectos o los beneficios de las fuentes de energía en lo que respecta a los residuos sólidos.

Las instalaciones carboeléctricas producen cenizas equivalentes a casi diez por ciento del combustible utilizado. Los índices de cenizas de las centrales de biomasa suelen ser mucho menores: menos de dos por ciento del combustible utilizado se vuelve ceniza luego de la combustión. En Estados Unidos, una tercera parte de la ceniza derivada de la combustión del carbón tiene otros usos productivos, mientras que el resto por lo general se deposita en rellenos sanitarios. Las cenizas de carbón pueden contener concentraciones importantes de metales pesados y otras sustancias tóxicas, como arsénico, cadmio y plomo, mientras que

las cenizas de la biomasa normalmente no son tóxicas o sólo contienen cantidades mínimas de sustancias tóxicas.

Los efectos del ciclo del combustible ocasionados por la minería de carbón o uranio a menudo son más importantes en cuanto a la generación de residuos sólidos y la contaminación del suelo que los efectos de la generación real de electricidad. Por cada unidad de combustible extraído, se producen cientos o incluso miles de unidades de residuos de roca. De modo que se deriva un problema de manejo de residuos, dado que los residuos de roca puede tener efectos adversos en la calidad del suelo.

Los residuos sólidos nucleares representan una preocupación particular. Si bien los residuos del ciclo de combustible y generación nucleares son relativamente limitados por volumen, su naturaleza extremadamente radiactiva plantea dificultades considerables para su manejo. The Pembina Institute ha llevado a cabo un amplio análisis del efecto ambiental de la capacidad canadiense para la generación nuclear.<sup>7</sup> Los jales de la extracción de uranio y los residuos de roca del procesamiento son ácidos o pueden generar ácidos, y contienen diversos radionucleidos de larga duración, metales pesados y otros contaminantes. El suministro de combustible para los 15,000 MW de capacidad nuclear de Canadá representa entre 90 y 100,000 toneladas al año de residuos. Cada año, los reactores nucleares canadienses generan alrededor de 85,000 ensambles de combustible residuales. En 2003 había 1.7 millones de ensambles almacenados en sitios donde hay reactores instalados. Se estima que estos desechos deberán resguardarse aproximadamente un millón de años por motivos de seguridad, ambientales y prevención. Cada año se generan en Ontario unas 6,000 toneladas de residuos de bajo nivel radiactivo como consecuencia de las operaciones, mantenimiento y acondicionamiento de las centrales eléctricas.<sup>8</sup>

En conclusión, las fuentes de energía renovable parecen ofrecer importantes beneficios en cuanto a los residuos sólidos y la contaminación del suelo en comparación con los sistemas carboeléctricos y nucleares, sobre todo por la eliminación de la escoria, los desechos mineros y los residuos radiactivos de larga duración.

### **2.3.5 Biodiversidad**

No se hallaron mediciones para cuantificar los efectos o beneficios de los sistemas de generación eléctrica en la biodiversidad. Las siguientes son algunas observaciones derivadas de la información disponible.

Conviene hacer notar que el tipo y la magnitud de la afectación del uso del suelo, abordados en el apartado 2.3.1, tienen importantes repercusiones en la vida silvestre y la biodiversidad. Los perjuicios para la biodiversidad pueden ser consecuencia de la alteración de los hábitats o la actividad de la vida silvestre. La minería de carbón, en particular, puede alterar extensiones considerables y fragmentar hábitats, pues crea barreras entre hábitats adyacentes. Además, los ecosistemas acuáticos también pueden verse dañados por los efluentes de la minería, lo que incluye la escorrentía ácida de los residuos de roca y los desechos de la minería.<sup>9</sup>

---

<sup>7</sup> *Nuclear Power in Canada: An Examination of Risks, Impacts and Sustainability*, The Pembina Institute, 2006, <[www.pembina.org/pub/1346](http://www.pembina.org/pub/1346)>.

<sup>8</sup> Los residuos radiactivos de bajo nivel incluyen materiales de construcción, herramientas y otros implementos que se han contaminado rutinariamente por su uso en una central nuclear.

<sup>9</sup> Aunque en esta evaluación no se consideran las emisiones atmosféricas, para fines comparativos cabe señalar que los contaminantes atmosféricos peligrosos derivados de la combustión de carbón pueden dañar las poblaciones de especies silvestres. Estos contaminantes pueden tener un efecto importante en la calidad del hábitat, la disponibilidad de alimentos y la salud de los animales. Para una comparación amplia de los efectos ambientales de diferentes fuentes de

Todas las centrales termoeléctricas con sistemas de enfriamiento pueden causar la muerte de peces y otras formas de vida acuática si chocan contra los filtros de toma de agua o la temperatura del agua llega a ser extrema. Lo mismo se aplica a las tomas de los sistemas hidroeléctricos.

En general, las centrales de energía renovable que cumplen con directrices de sustentabilidad tienen muy pocos efectos en la biodiversidad en comparación con las centrales carboeléctricas o nucleares.

Los sistemas de energía eólica ubicados cerca de las rutas migratorias de las aves pueden incidir en la mortalidad de las aves a causa de su colisión con las turbinas. Las evaluaciones ambientales para identificar los emplazamientos óptimos pueden ayudar a mitigar o eliminar efectos serios en las poblaciones de aves y murciélagos. El tipo, la ubicación y los calendarios de operación de las turbinas pueden influir en la muerte de aves y murciélagos. En Estados Unidos, la muerte de aves causada en la actualidad por las turbinas eólicas sólo representa una pequeña parte del total de muertes de aves como consecuencia de actividades humanas; se calcula que fue inferior al 0.003 por ciento del total en 2003.

Las centrales hidroeléctricas, que aprovechan la energía tanto del cauce de ríos como de embalses, pueden resultar nocivas para la vida acuática al perturbar el hábitat de los peces.

Las centrales de biomasa y biogás que usan desechos como fuente de combustible no tendrán un efecto importante en la biodiversidad siempre que los residuos agrícolas no se tomen del campo en vez de incorporarlos al suelo y, por tanto, reduzcan la materia orgánica en el suelo, o los residuos forestales no provengan de prácticas de tala no sustentables.

---

energía, se deben considerar las emisiones atmosféricas tóxicas, lo que incluye metales pesados, y aquellas que contribuyen a la lluvia ácida, como los compuestos de azufre y nitrógeno.

## 3.0 Metodologías más rigurosas

En el segundo apartado señalamos que son escasas las estimaciones cuantitativas para comparar los efectos negativos de las diferentes fuentes de energía en las cinco categorías de efectos no-atmosféricos abordadas en el presente estudio, pero se pueden hacer algunos cálculos de alto nivel de los beneficios de las fuentes de energía renovable. En este apartado veremos varias de las metodologías más rigurosas disponibles para medir y clasificar las desventajas y los beneficios relacionados con las fuentes de energía alternativas, incluidas aquellas que se pueden aplicar cuando sólo se cuenta con estimaciones cualitativas. Estas metodologías también permiten una clasificación comparativa de los beneficios y evaluar la compensación entre un beneficio y otro.

Las metodologías analizadas en este estudio se dividieron en tres categorías:

- Análisis cualitativo comparativo
- Comparación de los datos cuantitativos arrojados por los efectos ambientales
- Análisis del ciclo de vida

Estas metodologías se examinan conforme a los siguientes criterios:

- Alcance y duración de uso
- Aceptación de los grupos interesados
- Facilidad de uso
- Accesibilidad de datos de entrada

### 3.1 Análisis cualitativo comparativo

#### 3.1.1 Análisis para la toma de decisiones con base en criterios múltiples

El análisis para la toma de decisiones con base en criterios múltiples (*Multi-Criteria Decision Analysis*, MCDA), también conocido como análisis de atributos múltiples (*Multi-Attribute Analysis*), es un método para comparar diferentes opciones a partir de diversos criterios, que pueden llegar a ser contradictorios. Con frecuencia, el MCDA depende en medida importante de juicios de valor para determinar los criterios y su peso. A pesar de la falta de mediciones de cuantificación acordadas, el proceso puede ser útil para determinar los beneficios ambientales comparativos que otros métodos cuantitativos tal vez pasen por alto. Los métodos del MCDA son particularmente adecuados para enfrentar problemas muy complejos con ciertos criterios variables y contradictorios y permiten integrar consideraciones cualitativas y cuantitativas.

El MCDA es una familia flexible de métodos útiles para todo tipo de efectos, adaptables para hacerlos específicos o no de un sitio o momento, y aplicables de manera cuantitativa o cualitativa. Aunque tal vez no sea posible cuantificar la relación con los criterios respecto a las ventajas y desventajas de varias alternativas, los parámetros de evaluación de un MCDA pueden clasificar las alternativas en cuanto a los logros o ilustrar de alguna otra manera (por ejemplo, usando los métodos de jerarquización descritos a continuación) cuál es la mejor o la peor alternativa y, por ende, ofrecer al menos una idea de dónde se ubica cada opción en relación con las otras dentro de un continuo. Puede haber discrepancias importantes entre los métodos y es posible que ocurran grandes diferencias en los resultados en dos aplicaciones relacionadas de MCDA para el mismo análisis. Sin embargo, el propósito de un MCDA no es necesariamente obtener

una respuesta definitiva, sino actuar como un proceso de aprendizaje y descubrimiento de sesgos o diferencias en valores que tal vez no sean tan visibles en otras metodologías de evaluación de efectos.

Enseguida se describen a grandes rasgos algunas metodologías de MCDA de uso particularmente extendido que se podrían aplicar al análisis de efectos no-atmosféricos.<sup>10</sup> No existe “el mejor” método y el método elegido esencialmente depende de: a) el tipo y el alcance del criterio por evaluar; b) si el tipo de análisis es relativo o comparativo, un sistema de clasificación o abriga un objetivo distinto; c) los tipos y la calidad de los datos disponibles.<sup>11,12</sup>

- Proceso jerárquico analítico (*Analytic Hierarchy Process*, AHP).

El método AHP, ampliamente utilizado, consta de tres fases derivadas de los tres principios rectores: 1) “jerarquías de construcción”, 2) “establecimiento de prioridades” y 3) “congruencia lógica”.<sup>13</sup> Los criterios se dividen en una jerarquía por grupos. Se utilizan comparaciones por pares para establecer el peso de diferentes criterios dentro de jerarquías particulares.

- Método de evaluación de enriquecimiento para la organización de clasificación de preferencias (*Preference Ranking Organization Method of Enrichment Evaluation*, Promethee).

El Promethee es un método accesible de jerarquización de baja complejidad. Se basa en las diferentes opciones de clasificación y su mejor aplicación se da en situaciones en las que se puede evaluar un número finito de acciones mediante criterios contradictorios. El proceso del Promethee implica una comparación por pares de alternativas en el marco de un *conjunto coherente de criterios*.<sup>14</sup>

- Nuevo enfoque para la evaluación y la toma de decisiones imprecisas (*Novel Approach to Imprecise Assessment and Decision*, Naiade).

El Naiade es un método de MCDA de reciente creación que no asigna un peso explícito a los criterios. Permite el uso de información afectada por diferentes tipos de incertidumbre. Consiste en una comparación por pares de opciones, la suma de criterios y, posteriormente, la evaluación de opciones.

---

<sup>10</sup> Para mayor información sobre la aplicación del MCDA a los sistemas de energía, véase Fausto Cavallaro, “An Integrated Multi-Criteria System to Assess Sustainable Energy Options: An Application of the Promethee Method”, documento de trabajo núm. 22 de la Fondazione Eni Enrico Mattei (FEEM), 2005. Disponible en línea, en: [papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=666741](http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=666741).

<sup>11</sup> Para algunos lineamientos respecto a la selección del método MCDA, véase Adel Guitouni y Jean-Marc Martel, “Tentative guidelines to help choosing an appropriate MCDA method”, *European Journal of Operational Research*, vol. 109, núm. 2, 1998.

<sup>12</sup> Véase también Evangelos Triantaphyllou, *Multi-Criteria Decision Making Methods: A Comparative Study*, Springer, 2001.

<sup>13</sup> Andrea de Montis *et al.*, “Criteria for Quality Assessment of MCDA Methods”, Tercera Conferencia Bienal de la Sociedad Europea para la Economía Ecológica, 2000.

<sup>14</sup> Fausto Cavallaro, *op. cit.*

### **Alcance y duración de uso**

El MCDA se ha aplicado en ámbitos tan diversos como el manejo de energía, la planeación militar y la gestión de recursos humanos.<sup>15</sup> El marco del nuevo sistema de evaluación (*New Approach to Appraisal*), elaborado para evaluar los proyectos de transporte en el Reino Unido, constituye un ejemplo de aplicación práctica de gran alcance del MCDA. En los Países Bajos y sus municipios también se ha aplicado el MCDA en métodos “interactivos” para la formulación de políticas a escalas nacional, regional y local en la planeación de ciudades e infraestructura.<sup>16</sup> El MCDA ya se ha utilizado como método para evaluar los efectos generales de la energía renovable, en algunos casos con la inclusión de consideraciones acerca de efectos ambientales no-atmosféricos.<sup>17,18,19</sup>

### **Aceptación de los grupos interesados**

Como el MCDA es muy flexible, se presta bien para la participación temprana de una amplia variedad de grupos interesados en la determinación de los criterios de evaluación adecuados y del peso de esos criterios. Este proceso se usa normalmente como instrumento en la toma de decisiones participativa.<sup>20</sup>

### **Facilidad de uso y accesibilidad de datos de entrada**

Los datos de entrada que se pueden utilizar en el MCDA pueden ser cualitativos o cuantitativos. Gracias a su flexibilidad, el MCDA como método comparativo resulta útil para estructurar un análisis en función de los datos disponibles. Los análisis se pueden basar en los datos compilados para las evaluaciones del impacto ambiental u otras evaluaciones de proyectos en el caso de comparaciones de ciertos proyectos en particular, y pueden incluir una amplia variedad de datos de entrada dependiendo de los objetivos de quienes realizan el análisis. También por su flexibilidad, la facilidad de uso de este método por lo general depende de la complejidad del enfoque particular que decidan adoptar los sectores interesados.

Algunos de los MCDA antes descritos cuentan con fuentes de datos normalizados para la evaluación de efectos y los métodos basados en *software* pueden simplificar bastante las comparaciones normalizadas. No obstante, pocas de estas metodologías, si acaso alguna, abordan los efectos no-atmosféricos de las fuentes de energía en sus análisis.

## **3.2 Cálculos cuantitativos de los efectos ambientales**

### **3.2.1 Análisis de factores externos**

Aunque las metodologías de análisis de atributos múltiples permiten adquirir una comprensión valiosa de los efectos comparativos de las diferentes fuentes de energía, por lo general no ofrecen un mecanismo directo para determinar el valor económico de los diversos efectos comparativos. La bibliografía especializada indica que tal vez las iniciativas más importantes emprendidas para determinar el valor monetario de los efectos ambientales conlleven metodologías relacionadas con las evaluaciones de factores

---

<sup>15</sup> Jean-Marc Martel, “Multicriteria Decision Assessment: Methods and Applications”, CORS-SCRO, conferencia anual, Windsor, Ontario, 1999. Disponible en línea, en: <[www.cors.ca/bulletin/v33n1\\_1e.pdf](http://www.cors.ca/bulletin/v33n1_1e.pdf)> (consulta realizada en noviembre de 2007).

<sup>16</sup> René A.H. Monnikhof y Pieter W.G. Bots, “On the application of MCDA in interactive spatial planning processes: lessons learnt from two stories from the swamp”, *Journal of Multicriteria Decision Analysis*, vol. 9, núm.1-3, 2000.

<sup>17</sup> Fausto Cavallaro, *op. cit.*

<sup>18</sup> Lorna Greening y Steve Bernow, “Design of coordinated energy and environmental policies: use of multi-criteria decision-making”, *Energy Policy*, vol. 32, núm. 6, 2004.

<sup>19</sup> Diakoulaki *et al.*, *MCDA and Energy Planning in Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*, Jose Figueira *et al.* (comps.), Springer, 2004.

<sup>20</sup> René A.H. Monnikhof y Pieter W.G. Bots, *op. cit.*

externos. La asignación de valores monetarios a los factores externos puede ofrecer indicios y mecanismos más basados en el mercado que representen estos costos, véase el apartado 4.

Un ejemplo de análisis de factores externos podría ser el de las metodologías y datos específicos que ofrece el programa europeo ExternE, que constituye una base común para comparar los efectos de la generación eléctrica en relación con las emisiones.

### **Alcance y duración de uso**

El sector industrial privado, las autoridades locales y los gobiernos nacionales y regionales recurren con frecuencia a los análisis de factores externos para los procesos de toma de decisiones informadas.<sup>21</sup> En Estados Unidos se han llevado a cabo evaluaciones de factores externos durante al menos una década, con evaluaciones reglamentarias de efectos con miras a obtener un cálculo aproximado de los efectos de las emisiones en el medio ambiente y la salud. En Europa, el programa ExternE en particular ha influido en la legislación en materia de normas ambientales y sobre emisiones. Los estudios en los que se aplica el ExternE se han realizado por encomienda de la Comisión Europea, la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa y el gobierno del Reino Unido.<sup>22</sup>

### **Aceptación de los grupos interesados**

Las investigaciones indican que a fin de obtener la aceptación de los grupos interesados, los métodos para analizar los factores externos deben ser coherentes, integrales y transparentes.<sup>23</sup>

### **Facilidad de uso y accesibilidad de datos de entrada**

Por lo general, las evaluaciones de factores externos requieren datos bastante precisos y específicos. En el caso de los países europeos, el programa ExternE proporciona información útil sobre los efectos de las emisiones de determinadas fuentes de energía desglosada por región. No obstante, en América del Norte no existe una base de datos equivalente sobre los efectos no-atmosféricos cuantitativos, ni tampoco un programa análogo al ExternE.

## **3.2.2 Evaluación de impacto ambiental**

La evaluación de impacto ambiental (EIA) es el proceso de identificación y evaluación de las consecuencias ambientales de una actividad. La EIA se usa como auxiliar para la toma de decisiones en el sector público sobre proyectos de mayor envergadura y a menudo se utiliza para la evaluación de centrales eléctricas. Se han formulado prácticas óptimas generales para los procesos de EIA, aunque el proceso difiere mucho de una jurisdicción a otra.<sup>24</sup>

Las directrices para las EIA varía dependiendo del marco rector dentro del cual ocurren (por ejemplo, las EIA emprendidas como parte de la ley nacional de política ambiental se aplican de manera distinta en Estados Unidos y en Canadá).

---

<sup>21</sup> Mike Holland, "Applications of the ExternE Methodology", AEA Technology, 2001. Disponible en línea, en: <[arirabl.com/publications/myPapers/PollAtmos/ApplicExternE-PollAtmos.pdf](http://arirabl.com/publications/myPapers/PollAtmos/ApplicExternE-PollAtmos.pdf)> (consulta realizada en noviembre de 2007).

<sup>22</sup> *Ibid.*

<sup>23</sup> Lee B. Clarke, "Externalities and Coal-Fired Power Generation", *Atmospheric Environment*, vol. 31, núm. 9, 1997.

<sup>24</sup> International Association for Impact Assessment, "Principles of Environmental Impact Assessment", International Association for Impact Assessment, Fargo, Dakota del Norte, 1999. Disponible en línea, en: <[www.iaia.org/modx/assets/files/Principles%20of%20IA\\_web.pdf](http://www.iaia.org/modx/assets/files/Principles%20of%20IA_web.pdf)> (consulta realizada en noviembre de 2007).

El motivo de la pertinencia de la EIA para este informe es que si bien una EIA se concentra en un solo proyecto, el núcleo de la evaluación es el apartado que se ocupa de las alternativas.<sup>25</sup> En el apartado sobre alternativas de una EIA se presentan los efectos ambientales del proyecto propuesto y se comparan con los de las alternativas disponibles. Con todo, la adecuación de la mayoría de los procesos de EIA para determinar los efectos ambientales de las fuentes para la generación eléctrica es extremadamente limitada, pues la mayoría de las alternativas examinadas en las EIA representan variaciones menores del proyecto en estudio, y no una serie de distintas alternativas viables.

La EIA es un proceso que goza de amplia aceptación y requerido por muchos gobiernos de todo el mundo para el análisis de cierto tipo de proyectos. Aunque los detalles particulares de los métodos de EIA varían, Canadá, Estados Unidos y México han establecido procedimientos de EIA para evaluar nuevos proyectos. Muchos otros grupos interesados de América del Norte, ONG incluidas, participan en el proceso de EIA.

### 3.2.3 Evaluación de efectos ecológicos

La evaluación de efectos ecológicos (*Ecological Impact Assessment*, EcIA), un tipo más particular de EIA, tiende a predecir y evaluar los efectos de un proceso o un proyecto específico en los ecosistemas y sus componentes, y no se interesa tanto por las consecuencias económicas o sociales. Los instrumentos para evaluar los efectos ecológicos están actualmente en proceso de elaboración en el contexto del Convenio sobre la Diversidad Biológica.<sup>26</sup> Las directrices para considerar la diversidad biológica en la evaluación de efectos se publicaron por intermedio de la Comisión para la Evaluación Ambiental.<sup>27</sup> En el caso de efectos que se presentan en sitios específicos, se pueden adoptar (y de hecho se han adoptado) métodos de proyectos de EIA.<sup>28</sup> Para los efectos más amplios del sector energético, no habrá datos disponibles sobre sitios específicos y probablemente los análisis en el contexto de la EcIA se basarán en la clasificación de los tipos de paisaje afectados y en un cálculo general del efecto que una actividad en particular podría tener en una serie de ecosistemas. En algunas metodologías se han usado especies indicadoras para llevar a cabo un análisis de mayor alcance aplicando la EcIA.<sup>29</sup>

---

<sup>25</sup> “El apartado [sobre las alternativas] es el núcleo de la declaración sobre impacto ambiental”, de la Ley Nacional sobre Política Ambiental (*National Environmental Policy Act*, NEPA) de Estados Unidos, fracción 1502 de la Ley de Mejoramiento de la Calidad Ambiental (*Environmental Quality Improvement Act*) de 1970 y sus modificaciones (42 U.S.C. 4371 et seq.), sec. 309 de la Ley de Aire Puro (*Clean Air Act*) y sus modificaciones (42 U.S.C. 7609), y Orden ejecutiva 11514 (5 de marzo de 1970 y sus modificaciones según la Orden ejecutiva 11991, 24 de mayo de 1977).

<sup>26</sup> Riki Therivel y Stewart Thompson, *Strategic environmental assessment and nature conservation*, English Nature, Peterborough, 1996.

<sup>27</sup> Roel Sloomweg *et al.*, *Biodiversity in EIA & SEA: Voluntary Guidelines on Biodiversity-Inclusive Impact Assessment*, Commission for Environmental Assessment, 2006. Disponible en línea, en: <<http://www.cbd.int/doc/publications/cbd-ts-26-en.pdf>> (consulta realizada en mayo de 2008).

<sup>28</sup> Peter Wathern, “Ecological impact assessment”, en J. Petts (comp.), *Handbook of Environmental Impact Assessment*, vol. 2, Blackwell Science, Oxford, 1999, pp. 326-346.

<sup>29</sup> Jo Treweek, *Ecological Impact Assessment*, Blackwell Science, Oxford, 1999.

### 3.2.4 Evaluación de riesgo ambiental

Los procesos de evaluación tanto de riesgos como de riesgos de accidentes conllevan evaluar la probabilidad de que ocurran daños o efectos adversos como resultado de una actividad o decisión determinada.<sup>30</sup>

Evaluación de riesgos es un término amplio que abarca muchos tipos de evaluación diferentes. En relación con este informe en particular, las evaluaciones de riesgos se pueden hacer ya sea con base en la emisión de sustancias químicas —a menudo planeadas como parte de una actividad—, o bien en las posibilidades de que ocurran accidentes (sucesos no planeados que podrían tener efectos negativos). Esto último puede incluir aspectos ambientales.<sup>31</sup>

A escala internacional se han formulado protocolos para la evaluación de riesgos de sustancias químicas. Evaluar los riesgos planteados por las sustancias químicas por lo general incluye hacer un análisis de exposición que determine el tamaño y la naturaleza (es decir, la vulnerabilidad) de aquellos expuestos a emisiones, así como el alcance y duración de la exposición.<sup>32</sup>

En la evaluación de riesgos de accidentes se estiman las consecuencias de los accidentes y su frecuencia. Normalmente, la evaluación se divide en tres partes: identificación del riesgo, análisis de consecuencias y cálculo de frecuencia.<sup>33</sup> Para la identificación del riesgo, se ha formulado una serie de metodologías relativamente sencillas para auxiliar a los expertos en sistemas a identificar riesgos; por ejemplo, el análisis de riesgos y operatividad (*Hazards and Operability Analysis*, Hazop). Para la evaluación de consecuencias de los riesgos, se dispone de diversos métodos que cuantifican los efectos causados por accidentes.<sup>34</sup>

El análisis de riesgos de accidentes normalmente es prospectivo para los diferentes tipos de proyecto y específico de cada sitio. La evaluación de riesgos de las sustancias químicas también puede ser específica de cada sitio, pero asimismo más independiente de los sitios y aplicarse a una región o nación. Por lo general, incluye todas las emisiones de la sustancia dentro de ciertas fronteras geográficas o generadas por un proyecto o central en particular. Se pueden hacer comparaciones entre diferentes alternativas (¿cuál plantea el mayor riesgo?) o en relación con una norma (¿el riesgo es o no aceptable?). También se pueden hacer comparaciones internas en un sistema para identificar el principal riesgo. La evaluación de riesgos de sustancias químicas suele ser cuantitativa, mientras que la evaluación de riesgos de accidentes puede ser tanto cuantitativa como cualitativa.

Aunque la evaluación de riesgos no constituye por sí sola una base para la comparación de los efectos no-atmosféricos de las fuentes de energía, puede servir como componente de otros enfoques metodológicos; por ejemplo, el MDA, para dar cuenta de los riesgos.

---

<sup>30</sup> Marie-Noelle Pons y Thomas Gigerl, “Evaluation Tools”, Université de Nancy, Francia. Disponible en línea, en: <[www.ensic.u-nancy.fr/COSTWWTP/Pdf/Toimar\\_wg3.pdf](http://www.ensic.u-nancy.fr/COSTWWTP/Pdf/Toimar_wg3.pdf)> (consulta realizada en noviembre de 2007).

<sup>31</sup> Goran Finnveden y Asa Moberg, “Environmental Systems Analysis Tools”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 13, núm. 12, 2005.

<sup>32</sup> *Ibid.*

<sup>33</sup> Rob Verheem y Jos Tonk, “Strategic Environmental Assessment: One Concept, Multiple Forms”, *Impact Assessment and Project Appraisal*, vol. 18, núm. 3, 2000.

<sup>34</sup> Goran Finnveden *et al.*, “Strategic Environmental Assessment Methodologies – Applications within the Energy Sector”, *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 23, núm. 1, 2003.

### **Alcance y duración de uso**

La evaluación de riesgos se aplica desde hace varias décadas; por ejemplo, la Administración de Alimentos y Fármacos (*Food and Drug Administration, FDA*) de Estados Unidos aplica la evaluación de riesgos para la reglamentación de alimentos. Los protocolos para la evaluación de riesgos se han usado a fin de comparar los efectos en la salud humana de diferentes fuentes de energía.<sup>35</sup>

### **Aceptación de los grupos interesados**

La varianza y la incertidumbre son los principales factores para hacer una evaluación de riesgos. En el caso de las evaluaciones de riesgos basadas en accidentes que ocurren una sola vez, establecer factores cuantitativos para características de riesgos particulares puede ser un proceso sumamente subjetivo y tener como consecuencia una falta de aceptación entre ciertos sectores interesados.

### **Facilidad de uso y accesibilidad de datos de entrada**

La facilidad de uso en las evaluaciones de riesgos y la accesibilidad de datos de entrada depende en gran medida del alcance y el tipo de la evaluación emprendida; en el caso de la accesibilidad de datos de entrada, esta variación depende de si la evaluación analiza factores cualitativos o cuantitativos para la determinación de riesgos.

## **3.3 Evaluación del ciclo de vida**

La evaluación o análisis del ciclo de vida (*Life-Cycle Assessment, LCA*) es un método para calcular el desempeño ambiental de productos o servicios basados en todas las etapas de su producción, uso y eliminación. Hay diferentes metodologías para llevar a cabo una LCA, pero hay elementos universales en los procesos definidos por la Organización Internacional de Normalización (ISO) en su Norma ISO 14040. Cuando se dispone de datos apropiados, algunas metodologías de LCA pueden ayudar a hacer comparaciones entre elementos equivalentes de ciertas actividades, productos o procesos en el contexto de los efectos ambientales totales.

De acuerdo con las normas ISO, en términos generales la LCA deberá constar de cuatro etapas principales:

1. Objetivo y definición de alcance.
2. Análisis de inventarios, que incluye la identificación y cuantificación de entradas y salidas.
3. Evaluación del efecto del ciclo de vida (*Life cycle impact assessment, LCIA*), que tiene por objeto determinar el grado y la magnitud de los posibles efectos ambientales. Esta fase se subdivide en tres partes:
  - a. Identificación y selección de categorías, indicadores y modelos de efectos para evaluar la influencia de diferentes entradas y salidas en las categorías de efectos.
  - b. Asignación de datos de inventario a las categorías de efectos.
  - c. Cuantificación de las contribuciones del proceso a las categorías de efectos.
4. Interpretación, cuando los hallazgos del análisis de inventario y de la LCIA se analizan en el contexto del objetivo y el alcance del estudio como se define en la etapa 1.

---

<sup>35</sup> Ren Tianshan *et al.*, “Comparative Health Risk Assessment of Nuclear Power and Coal Power in China”, *Journal of Radiological Protection*, vol. 18, 1998.

No todos los tipos de efecto ambiental se pueden abordar con la misma eficacia en las LCA.<sup>36</sup> Históricamente, los efectos en el uso del suelo han sido difíciles de evaluar, aunque se observa un considerable desarrollo metodológico en años recientes.<sup>37</sup> La falta de datos puede complicar la inclusión de estimaciones para todos los efectos posibles, dado que la LCA se centra en el cálculo cuantitativo. Los efectos relacionados con la radiación, accidentes y efectos adversos en los servicios normalmente no se abordan, al menos no adecuadamente, en las LCA, pero esto puede variar según el alcance de la LCA y si el método aplicado considera efectos a largo plazo o “heredados”. Gracias a su diseño actual, la mayoría de las tecnologías de LCA son más eficaces para evaluar los efectos de las emisiones atmosféricas —como las de gases de efecto invernadero— de un proceso o producto. En vista de su enfoque básicamente cuantitativo, las LCA también tienden a ser una herramienta que hasta cierto punto depende del sitio.

La LCA tiene algunas otras limitaciones importantes, aunque se pueden superar con un diseño apropiado del método. Resulta difícil incluir las características espaciales y temporales variables de ciertos procesos.<sup>38</sup> Las características con cualidades temporales diversas a menudo se omiten por la dificultad de incluirlas en los análisis típicos de la LCA.

### **Metodologías de la LCA**

Aunque no todas las metodologías siguientes se pueden aplicar directamente al análisis, cada una de ellas posee elementos importantes que pueden ser útiles para diferenciar entre el grado y el tipo de efectos no-atmosféricos de diferentes fuentes de energía.

#### ■ Evaluación del valor del ciclo de vida<sup>39</sup>

La evaluación del valor del ciclo de vida (*Life-Cycle Value Assessment*, LCVA) es una metodología formulada en los últimos diez años por The Pembina Institute en colaboración con varias empresas del sector eléctrico. La LCVA se basa en una metodología similar a la del concepto general de la LCA, pero posee dos características distintivas:

1. En la LCVA no sólo se consideran los efectos ambientales del ciclo de vida, sino también sus efectos económicos y sociales.
2. La LCVA agiliza la recolección de datos y el proceso de análisis al permitir tanto la formulación de supuestos que agregan un nivel aceptable de incertidumbre al proceso como la obtención de resultados útiles dentro de las limitaciones de tiempo y recursos disponibles.

#### ■ Eco-indicator 99<sup>40</sup>

Eco-indicator 99 es una metodología privada de LCA, ampliamente utilizada y orientada a los daños elaborada en 1999 por Product Ecology Consultants. Con esta metodología se pueden calcular calificaciones para los diversos procesos. Estos puntajes se basan en una metodología de evaluación de efectos que transforma los datos de entrada en calificaciones según el daño en el contexto de daños a la salud humana, calidad del ecosistema y recursos. Esta metodología permite evaluar los daños ambientales

---

<sup>36</sup> Goran Finnveden *et al.*, *op. cit.*

<sup>37</sup> Erwin Lindeijer, “Impact Assessment of Resources and Land Use”, cap. 2, en *Life-Cycle Impact Assessment: Striving Towards Best Practice*, Helias Udo de Haes *et al.* (comps.), SETAC, 2002.

<sup>38</sup> Helias Udo de Haes *et al.*, “Three Strategies to Overcome the Limitations of Life-Cycle Assessment”, *Journal of Industrial Ecology*, vol. 8, núm. 3, 2006.

<sup>39</sup> Disponible en línea, en: <<http://www.lcva.ca/>>.

<sup>40</sup> Disponible en línea, en: <<http://www.pre.nl/eco-indicator99/default.htm>>.

para la calidad de los ecosistemas y la salud humana causados por el uso del suelo y ciertas emisiones al agua y el suelo. Asimismo, por medio del inventario de Eco-indicator 99 se pueden evaluar emisiones al agua y el suelo de muchas sustancias distintas. Hay varias fallas notorias en esta metodología, como la imposibilidad de evaluar la acidificación y la eutrofización ocasionadas por las emisiones transportadas en el agua.

Muchas de las metodologías de Eco-Indicator 99 calculan los daños y los efectos no-atmosféricos de diferentes sustancias y procesos. Por ejemplo, cuentan con un procedimiento de cálculo para los daños en humanos ocasionados por la ingestión de metales pesados contenidos en el agua potable.

- CML 2002<sup>41</sup>

Creado por el Instituto de Ciencias Ambientales de la Universidad de Leiden, el CML es un enfoque orientado a problemas que ofrece una guía con una lista de categorías de evaluación de efectos.

El enfoque del CML depende de una base de datos común de factores de efectos. En la actualidad faltan muchos factores necesarios para comparar los efectos no-energéticos de las fuentes de energía, pero su inclusión está planeada para futuras versiones de la metodología CML. Entre estos factores se cuentan aquellos relacionados con el uso de suelo, la acidificación, la nitrificación y la radiación de ionización.

Los factores ahora presentes en la base de datos del CML 2002 no permiten una comparación adecuada de fuentes de energía para la generación eléctrica en lo que respecta a los efectos no-atmosféricos, aunque esto puede cambiar con la adición de nuevos factores en el futuro cercano.

#### **Facilidad de uso y accesibilidad de datos de entrada**

Por la naturaleza privada del sistema Eco-indicator 99, así como del *software* y los conjuntos de datos que lo acompañan, los costos pueden representar un obstáculo para quienes no lo han comprado. Sin embargo, como se trata de un sistema que funciona a partir de un software al que está integrada una base de datos común de factores de efectos, en principio el sistema es bastante fácil de usar. Estas desventajas son comunes a la mayoría de los sistemas de LCA privados.

La principal dificultad para la accesibilidad de datos de entrada es que cuando el sistema no cuenta con los factores o criterios de comparación deseados puede resultar complicado, si no es que imposible, incluirlos en un análisis.

#### **Aceptación de los grupos interesados**

Una vez más, debido a la naturaleza privada del sistema, su software y datos, puede ser difícil lograr transparencia cuando se aplica una LCA. Es posible que los sectores interesados no se sientan satisfechos con la imposibilidad de evaluar los datos y supuestos usados en la metodología de Eco-indicator 99.

### **3.4 Comparación de metodologías**

Aunque el análisis del ciclo de vida (LCA), la evaluación de factores externos y el análisis para la toma de decisiones basada en criterios múltiples (MCDA) se orientan a fines un tanto distintos en la determinación del valor comparativo de una serie de opciones, sus metodologías se traslapan en ciertos aspectos. Cada uno de estos enfoques tiene ventajas y desventajas. Al combinar los tres, con la LCA como un subconjunto de la MCDA y la evaluación de factores externos, se pueden reunir los beneficios de cada enfoque al

---

<sup>41</sup> Disponible en línea, en: <<http://www.leidenuniv.nl/cml/ssp/>>.

tiempo que se atenúan sus limitaciones. Estos análisis combinados son posibles y ya se han llevado a cabo con buenos resultados en la evaluación de la sustentabilidad de los sistemas de generación eléctrica.<sup>42,43</sup>

En otro útil estudio se compararon los costos externos calculados para un conjunto de tipos de centrales eléctricas y como resultado se derivó un análisis de criterios múltiples en el que los efectos ambientales se expresan en términos físicos o en una escala cualitativa.<sup>44</sup> Las similitudes y discrepancias en las clasificaciones obtenidas se identificaron y esclarecieron de acuerdo con los principios fundamentales de ambos enfoques. La conclusión del estudio fue que, si bien los costos externos no reflejan con precisión el sistema de valores tradicionales de cada uno de los responsables de la toma de decisiones, ofrecen indicios de precio adecuados y, de este modo, contribuyen a eliminar las distorsiones del mercado de energía actual. El estudio también mostró que, de suyo, el análisis de criterios múltiples constituye una manera relativamente eficaz de clasificar los atributos ambientales de varias fuentes de energía, incluidos los beneficios no-atmosféricos.

En el contexto de este estudio, donde se dispone de pocas estimaciones cuantitativas de los efectos, parece que la evaluación de criterios múltiples es la única metodología que actualmente puede aplicarse eficazmente para calcular los beneficios no-atmosféricos de las fuentes de energía renovable.

---

<sup>42</sup> Roberto Dones, "Sustainability of Electricity Systems LCA applied in External Cost and Multi-Criteria Assessments", *Proceedings of the Seventh International Conference on EcoBalance*, 2006.

<sup>43</sup> Simon Berring y Dana Ung, "A Methodology for Environmentally Informed Decision-Making: Towards Sustainable Projects", Centre for Integrated Facility Engineering, 2003. Disponible en línea, en: <cife.stanford.edu/online.publications/WP083.pdf> (consulta realizada en noviembre de 2007).

<sup>44</sup> Sebastianos Mirasgedis y Dzionu Diakoulaki, "Multi-criteria Analysis vs. Externalities Assessment for the Comparative Evaluation of Electricity Generation Systems", *European Journal of Operational Research*, vol. 102, 1997.

## 4.0 Asignación de valores monetarios

Como hemos visto en los apartados anteriores, en su mayoría, los efectos no-atmosféricos de los sistemas de energía renovable tienen que ver con los efectos negativos del uso de sistemas de energía convencionales que se evitan. Al asignar un valor monetario a estos beneficios, sería posible medir el valor del cambio en los componentes de los ecosistemas derivado del uso de diferentes tecnologías para evaluar los beneficios relativos de una forma de generación eléctrica en comparación con otra. De este modo, se podría llevar a cabo una evaluación de las diferentes opciones de generación eléctrica sobre las mismas bases (monetarias).

Históricamente, el cálculo de los beneficios monetarios de la energía renovable se ha relacionado sobre todo con las emisiones atmosféricas evitadas (véase apartado 3.2). Es posible aplicar estos métodos de valuación a los beneficios no-atmosféricos que ofrece la energía renovable en comparación con las fuentes de energía convencionales. También se están usando evaluaciones del capital natural y la función ecológica para abordar diferentes usos de suelo; basarse en estos métodos podría ser de utilidad a fin de nivelar el terreno de juego para la energía renovable.

El valor de los beneficios ecológicos no-atmosféricos se ha tratado ampliamente en la bibliografía sobre economía ecológica y ambiental. Gran parte de la investigación básica sobre valuación monetaria se ha centrado en examinar el mayor valor que los consumidores asignan a la energía renovable,<sup>45</sup> pero las investigaciones no miden el valor de los beneficios no-atmosféricos que ofrecen estas tecnologías en relación con los sistemas de generación eléctrica convencionales (basados en combustibles fósiles).

Más recientemente, se han llevado a cabo investigaciones con el método de la huella ecológica para determinar toda la serie de beneficios ecológicos que brindan muchos productos, como la energía renovable.<sup>46</sup> Esta investigación representa una buena oportunidad para avanzar en la asignación de un valor monetario a los beneficios no-atmosféricos derivados de la energía renovable partiendo de métodos de transferencia de beneficios.

Existen varios ejemplos de valuación de los factores externos de las emisiones atmosféricas (como se indicó en el apartado 3.2). En un estudio se presentan valuaciones de los recursos agrícolas, madereros e hídricos, así como de la intrusión de ruido y visual de una serie de fuentes convencionales y renovables, pero en ningún caso se calcularon estos efectos para todas las fuentes de energía.<sup>47</sup> Como se mencionó en el apartado 3.4, en este estudio se concluyó que, si bien los costos externos no reflejan con precisión el sistema de valores tradicional de cada uno de los responsables de la toma de decisiones como se evidencia en la evaluación basada en criterios múltiples, ofrecen indicios de precios adecuados y, de este modo, ayudan a eliminar las distorsiones del mercado de energía actual.

En esta parte del informe describiremos los tipos de valuación y algunos de los principales métodos para hacer una evaluación.

---

<sup>45</sup> Ryan Wisser, "Using contingent valuation to explore willingness to pay for renewable energy: A comparison of collective and voluntary payment vehicles", *Ecological Economics*, vol. 62, 2007, pp. 419-432.

<sup>46</sup> Mark Huijbregts, Stefanie Hellweg, Rolf Frischknecht, Konrad Hungerbuhler y J.A. Hendriks, "Ecological footprint accounting in the life cycle assessment of products", *Ecological Economics*, en prensa, 2007.

<sup>47</sup> Sebastianos Mirasgedis y Diakoulaki Dzidonu, "Multicriteria Analysis vs. Externalities Assessment for the Comparative Evaluation of Electricity Generation Systems", *European Journal of Operational Research*, vol. 102, 1997.

## 4.1 Valuación de bienes y servicios de los ecosistemas

La valuación de bienes y servicios de ecosistemas es el proceso de asignar un valor monetario a los componentes ecológicos o los servicios que brindan esos componentes. La valuación sienta bases comunes para comparar las implicaciones sociales, económicas y ambientales de las decisiones en materia de políticas, lo que permite a los responsables de la formulación de políticas dar plena cuenta de los beneficios que el ambiente natural ofrece a la sociedad. Asignar un valor a los bienes y servicios de los ecosistemas requiere el uso de métodos a la medida que determinen el valor de un bien o servicio.

Si bien existe cierto grado de incertidumbre y subjetividad cuando se valúan bienes y servicios de ecosistemas, las metodologías establecidas (como se analiza más adelante) servirán para limitar estas preocupaciones. La valuación de bienes y servicios de ecosistemas se basa en la hipótesis de trabajo de que los humanos dependen de los servicios que ofrecen los ecosistemas. Si no se aborda adecuadamente el valor de los componentes de los ecosistemas en un sistema económico de mercado, el uso de los recursos naturales y el crecimiento económico tienden a considerar estos bienes como si no tuvieran costo, por lo que cada vez demandan más. Sin embargo, en realidad un ecosistema tiene un valor equivalente a la suma de sus funciones de ecosistema y todos los beneficios para los humanos derivados de la existencia de los ecosistemas. Así como se puede asignar un valor a la tala permisible anual de un bosque maderable, se puede hacer lo propio con otros bienes y servicios —como la filtración de agua, el secuestro de carbono y el ciclo de nutrientes— que brindan los ecosistemas.

La valuación se puede efectuar en varias escalas: para un componente particular de un ecosistema (como un humedal), a escala de un paisaje o una cuenca hidrográfica, o para una región definida (provincia, país, región, etcétera).

Hay una serie de desafíos relacionados con la valuación de los bienes y servicios de ecosistemas:

- La disponibilidad de datos apropiados
- El establecimiento de un vínculo claro entre la ciencia y los beneficios económicos
- La tendencia al sesgo de algunas técnicas de valuación
- La falta de profesionales capacitados
- La cooperación interdisciplinaria
- La comprensión y la aceptación públicas de la importancia de valorar los bienes y servicios ecológicos

## 4.2 Metodologías de valuación

En términos generales, los ecosistemas encierran cuatro tipos de valor:

- Valor de uso directo: el valor derivado del uso directo del ecosistema o recurso, como el valor de un caribú como recursos alimenticio.
- Valor de uso indirecto: el valor derivado del uso indirecto del ecosistema o recurso, como el valor de un humedal para el control de inundaciones.
- Valor opcional: el valor derivado de preservar hoy un recurso o ecosistema para tener la opción de usarlo en el futuro; por ejemplo, preservar un árbol hoy de modo que pueda ser usado en el futuro.
- Valor de no uso: también llamado valor inherente, se divide en tres tipos: a) el valor que otros pueden derivar de un recurso o ecosistema, b) el valor que generaciones futuras pueden derivar de un recurso o ecosistema, y c) el valor derivado de saber que existe el recurso o ecosistema.

Los valores descritos se pueden determinar de tres maneras:

- Método de preferencia revelada: uso de precios de mercado para medir el beneficio o costo para los individuos de determinada línea de acción observando el comportamiento de la gente en mercados definidos. Como ejemplo de métodos de preferencia revelada tenemos la función de producción, el costo de sustitución, el costo de viaje y la fijación de precios hedonista.
- Método de preferencia establecida: uso de encuestas para determinar las preferencias de la gente (medidas según la disposición para pagar o para aceptar) respecto a una línea de acción hipotética. Como ejemplos de los métodos de preferencia establecida tenemos la valuación contingente y los modelos de elección.
- Método de transferencia de beneficios: uso de la información sobre valuación de otras jurisdicciones con características similares.

Para dos de los tres métodos presentados, el de preferencia revelada y el de preferencia establecida, se han elaborado varias metodologías específicas que abordan funciones y procesos específicos de los ecosistemas. En el cuadro 3 se presenta un esquema de las metodologías para determinar los valores de bienes y servicios ambientales y se identifica su enfoque, aplicaciones, necesidades y limitaciones respectivos.

**Cuadro 3: Aspectos generales de los métodos de valuación<sup>48</sup>**

Metodología	Enfoque	Aplicación	Necesidades de datos	Limitaciones
<b>Métodos de preferencia revelada</b>				
Función de producción	Identificar el efecto de un cambio en los servicios de un ecosistema sobre los bienes producidos.	Cualquier medición de efectos sobre los bienes producidos.	Efecto del cambio en los servicios sobre la producción y el valor neto de los bienes producidos.	- A menudo faltan datos que vinculen el cambio en el servicio con el cambio en la producción. - Las imperfecciones del mercado (subsídios, falta de transparencia) distorsionan el precio de mercado.
Costo del capital humano	Identificar el efecto de un cambio en los servicios de un ecosistema sobre la morbilidad o la mortalidad.	Cualesquier efectos sobre la salud.	Cambio en el efecto de los servicios sobre la salud humana, el costo de la enfermedad o el valor de la vida.	- Vincular la condición ambiental con la salud humana es difícil y el resultado a menudo es deficiente. No es fácil calcular el valor de la vida.
Costo de sustitución	Calcular el costo de sustituir el bien o el servicio perdido.	Cualquier pérdida de bienes y servicios.	Magnitud de la pérdida de bienes o servicios. Costo de sustituirlos (por ejemplo, costo de sustituir los bosques).	- Tiende a sobrestimar el valor real, se debe usar con precaución extrema.
Costo de viaje	Derivar una curva de demanda de los datos sobre los costos de viaje reales.	Recreación.	Encuesta para recabar información sobre los costos monetarios y en tiempo de viajar a un destino.	- Se limita a los beneficios recreativos; es difícil usarlo en el caso de viajes a destinos múltiples.
Fijación de precios hedonista	Extraer el efecto de los factores ambientales o situacionales sobre el precio de bienes que incluyen esos factores.	Calidad del aire, belleza escénica, beneficios culturales.	Precios y características de los bienes (por ejemplo, valores de la vivienda).	- Requiere grandes cantidades de datos. - Muy sensible a la especificación.
<b>Métodos de preferencia establecida</b>				
Valuación contingente	Preguntar a los entrevistados sobre su disposición a pagar por un servicio especificado.	Cualquier servicio.	Situaciones en las que se pregunta a la gente sobre su disposición a pagar por bienes y servicios.	- Muchas posibles fuentes de sesgo en las respuestas, aunque hay lineamientos para una aplicación confiable.
Modelos de elección	Pedir a los entrevistados que elijan su opción preferida de una serie de alternativas.	Cualquier servicio.	Encuesta	- Similares a las de la valuación contingente. - Complejidad del análisis de datos.
<b>Otros métodos</b>				
Transferencia de beneficios	Usar los resultados obtenidos en otros métodos.	Cualquier servicio para el que haya una comparación.	Ejercicios de valuación en otro sitio similar.	Puede ser muy impreciso porque muchos factores varían aun cuando el contexto parece similar.

<sup>48</sup> Modificado de: Stefano Pagiola, *How much is an ecosystem worth?: Assessing the economic value of conservation*, Banco Mundial, 2004. Disponible en línea, en: [www.biodiversityeconomics.org/document.rm?id=710](http://www.biodiversityeconomics.org/document.rm?id=710) (consulta realizada en enero de 2007).

Existe una extensa bibliografía sobre la valuación ambiental.<sup>49</sup> En algunos estudios se ofrece una mayor orientación sobre los métodos para la valuación monetaria de los efectos ambientales derivados de la generación eléctrica, al tiempo que sirven de estudios de caso para los métodos de valuación. Kammen y Pacca (2004) presentan un estudio de los métodos para calcular los costos de la electricidad, incluidos los sobrepuestos relacionados con riesgos o efecto ambientales.<sup>50</sup>

Existen elaboraciones sobre las complejidades que plantean muchos de los enfoques de valuación. Un ejemplo de las mismas es que la preferencia de la sociedad puede variar con el tiempo, lo que hace que las preferencias reveladas anteriores resulten inadecuadas para propósitos de valuación basados en ese enfoque. En 2002, Sundqvist y Söderholm llevaron a cabo un estudio crítico sobre la valuación de los efectos ambientales de la generación eléctrica. Estos autores señalan que “[l]a utilidad de tareas previas de valuación económica para fines de políticas... se complica por el hecho de que, según la bibliografía sobre economía del bienestar, la valuación se basa en: a) suposiciones de comportamiento relativamente restrictivas y b) la idea de que el principio ético que rige la elección social es la eficiencia económica”.<sup>51</sup> Sus hallazgos también indican que [c]omo probablemente la gente expresa sus preferencias públicas y no privadas (por ejemplo, la maximización de los servicios públicos) respecto a algunos efectos externos, la elección social entre las diferentes fuentes de energía debe hacerse cada vez más dentro del ámbito del discurso público, donde pueden entrar en juego principios éticos adicionales”.<sup>52</sup> Estos elementos de valuación relativamente intangibles pueden representar “blancos en movimiento” a los que es difícil atinar.

Los valores discrepantes pueden complicar más estos enfoques de valuación: “la idea de que la eficiencia económica es el objetivo final de las políticas probablemente no la compartan todos los legos y los políticos. Esto significa que, a diferencia de muchos economistas, es probable que se sientan más favorables a promover [...] una definición mucho más amplia de los factores externos que la hallada en la bibliografía”.<sup>53</sup>

---

<sup>49</sup> Para un análisis más detallado de los métodos de valuación monetaria de los servicios y efectos ambientales, véase Guy Garrod y Ken Willis, *Economic Valuation of the Environment: Methods and Case Studies*, Edward Elgar, Cheltenham, 1999.

<sup>50</sup> Daniel Kammen y Sergio Pacca, “Assessing the Costs of Electricity”, *Annual Review of Environment and Resources*, vol. 29, 2004, pp. 301-344.

<sup>51</sup> Thomas Sundqvist y Patrik Söderholm, “Valuing the Environmental Impacts of Electricity Generation”, *Journal of Energy Literature*, vol. 8, núm. 2, 2002.

<sup>52</sup> *Ibid.*

<sup>53</sup> *Ibid.*

## 5.0 Guía para el cálculo de beneficios

En este apartado se presenta una guía paso a paso para que los promotores de proyectos de energía renovable identifiquen y calculen los beneficios no-atmosféricos de su proyecto. Se ofrece al usuario la opción de utilizar la información del apartado 2 de este documento o de usar un enfoque de evaluación más riguroso, basado en criterios múltiples, como el que se describe en el apartado 3. Los pasos son los siguientes:

1. Asegurarse de que los proyectos de energía renovable cumplen con los criterios de sustentabilidad correspondientes a la tecnología usada. Usar el cuadro 2 del apartado 2 para calcular cualesquier efectos negativos si no se cumplen todos los criterios.
2. Definir el tamaño y el tipo de todas las fuentes de energía convencionales que el proyecto podría sustituir o desplazar.
3. Con base en el cuadro 1 del apartado 2, calcular los efectos de estas fuentes de energía convencional equivalentes para calcular el uso de suelo, el consumo de agua, la calidad del agua, la contaminación por residuos sólidos y del suelo, y los beneficios para la biodiversidad del proyecto.
4. Si se dispone de datos y de tiempo, aplicar el enfoque de criterios múltiples descrito en el apartado 3 para hacer una comparación más rigurosa con las fuentes de energía convencional, incluida la clasificación entre beneficios no-atmosféricos.
5. Si es posible determinar el valor monetario de los beneficios, usar uno de los métodos descritos en el apartado 4 para hacer un cálculo.

### Paso 1: Asegurarse de que el proyecto cumple con los criterios de sustentabilidad

#### *Todos los proyectos*

Criterios universales del programa Eco-Logo. Para que la generación eléctrica sea renovable debe:

- Cumplir en todas las fases del proceso con los requisitos establecidos por la legislación y los reglamentos aplicables.
- Demostrar que se ha celebrado una consulta adecuada con las comunidades y los sectores interesados y, si se aplica, que se ha llevado a cabo una mitigación razonable de los efectos negativos.
- Demostrar que el proyecto no tendrá como consecuencia un conflicto por los terrenos, pérdida de la biodiversidad o degradación de los valores patrimoniales, culturales, recreativos o turísticos.
- No perjudicar a las especies clasificadas como en peligro de extinción o amenazadas.

### *Criterios para cada tipo*

#### **Solar fotovoltaica (Eco-Logo)**

Se debe demostrar que se llevaron a cabo gestiones adecuadas para asegurar la eliminación o reciclaje apropiados de todos los residuos sólidos, lo que incluye la disposición final del equipo o la maquinaria utilizados.

#### **Solar termoeléctrica**

No disponible.

#### **Eólica (Eco-Logo)**

- No ser perjudicial para las especies de aves autóctonas o migratorias.
- No ubicarse en un área protegida para especies de aves en peligro de extinción o amenazadas.
- No causar una erosión excesiva del suelo.
- Haber replantado la vegetación desarraigada y reemplazar el suelo excavado luego de la construcción o demolición.

#### **Hidroeléctrica**

Con embalse (Directrices de Sustentabilidad de la Asociación Internacional de Energía Hidroeléctrica, Low Impact Hydropower Institute,<sup>54</sup>/Green-e), se deben adoptar estrategias de mitigación respecto a:

- Calidad del agua
- Transporte de sedimentos y erosión
- Hidrología corriente abajo y flujos ambientales (incluida la fluctuación estacional)
- Protección de cuencas hidrográficas
- Especies raras y en peligro
- Tránsito de especies ictiológicas
- Especies de plagas de flora y fauna dentro del embalse
- Aspectos sanitarios
- Actividades de construcción
- Sistemas de manejo ambiental

#### **Hidroeléctrica**

Desde el cauce de un río (Eco-Logo, Green-e):

- No operar conforme a una autorización que permita la alteración dañina o perturbación del hábitat de los peces, a menos que la alteración no afecte el factor limitante que controla la capacidad productiva y la pérdida del hábitat afectado se compense con la creación de un hábitat similar.

---

<sup>54</sup> Low Impact Hydropower Institute, "Low Impact Hydropower Certification Criteria: Summary of Goals and Standards". Disponible en línea, en: <[http://www.lowimpacthydro.org/documents/criteria\\_summary.pdf](http://www.lowimpacthydro.org/documents/criteria_summary.pdf)> (consulta realizada en mayo de 2008).

- Coordinar sus operaciones con otras instalaciones de control hidráulico para mitigar los efectos.
- Operar de modo que:
  - Los flujos disminuidos de agua en las áreas circunvaladas no sean perjudiciales para las especies autóctonas que habitan ahí.
  - Los caudales corriente abajo sean adecuados para sustentar las especies autóctonas que habitan ahí.
  - La calidad del agua sea comparable a la de cuerpos de agua no alterados dentro de la cuenca hidrográfica local, lo que incluye asegurar que los cambios en la temperatura del agua no sean perjudiciales para las especies autóctonas que habitan ahí.
- Ofrecer medidas para minimizar la mortalidad de los peces que se derivaría de las colisiones con el equipo y el arrastre, y asegurar que haya tránsito de peces en los lugares en los que se construyan estructuras artificiales donde no existen barreras naturales.
- Tener, como indica Green-e para instalaciones de generación desde el cauce de un río, capacidades nominales de 5 MW o menores.

### **Biomasa**

(Eco-Logo, Federación Nacional para la Vida Silvestre [Estados Unidos], Foro Brasileño de ONG y Movimientos Sociales [FBOMS], Equipo de Tarea para la Transición Energética de los Países Bajos, Green-e)

- Evitar la competencia local por el suelo, materias primas, agua y mano de obra relacionados con la producción de alimento, material de construcción, suministro de energía y medicamentos.
- Mantener la estructura y al fertilidad del suelo mediante labranza para la conservación, rotación de cultivos, terrazas, cultivos de cobertura, franjas de amortiguamiento, canales de agua vegetados y labranza periódica, de modo que queden los residuos adecuados de los cultivos.
- Proteger la diversidad biológica, tanto terrestre como acuática, y mantener la riqueza y distribución de las especies silvestres.
- Maximizar el uso de la diversidad de los cultivos, cultivos agroforestales; desalentar los monocultivos y el uso de sustancias químicas persistentes.
- No destruir bosques básicos, praderas y pastizales autóctonos y otras zonas con un alto valor de conservación para los cultivos energéticos.
- Usar especies, variedades y plantas perennes autóctonas; evitar el uso de especies invasoras y variedades de organismos genéticamente modificados.
- Usar sólo residuos de madera o agrícolas derivados de operaciones con un sistema de manejo ambiental adecuado y prácticas adecuadas de manejo ambiental.
- Usar sólo cultivos energéticos dedicados que se originen de operaciones con un sistema de manejo ambiental adecuado y prácticas adecuadas de manejo ambiental.
- Asegurar que el ritmo de cosecha no exceda los niveles sustentables y no se usen residuos de especies mencionadas en los apéndices de la CITES.
- Permitir que los residuos sólidos municipales puedan ser elegibles si se convierten primero a un combustible respetuoso del medio ambiente. La tecnología para la conversión de

combustible debe ser un proceso ajeno a la combustión, no producir residuos peligrosos o descargas peligrosas en el agua y eliminar todos los materiales reciclables de la corriente de residuos.

### **Biogás**

No hay criterios específicos disponibles para los beneficios no-atmosféricos.

### **Mareomotriz y del oleaje**

Ningún criterio disponible.

### **Geotérmica**

Ningún criterio disponible.

Si el proyecto cumple con los criterios recién listados —según corresponda por el tipo de generación de que se trate—, puede darse por sentado que no tiene efectos negativos importantes vinculados. Si no cumple con estos criterios, entonces los efectos mencionados en el cuadro 2 se deben tener en cuenta en el paso 3.

## **Paso 2: Definir las alternativas convencionales para obtener la misma carga**

Los beneficios del proyecto de energía renovable dependerán de los efectos no-atmosféricos evitados de los proyectos de energía convencional que satisfarían los mismos requerimientos de energía eléctrica en la misma localidad.

La mayoría de las centrales eléctricas de energía renovable típicas son más pequeñas que las centrales convencionales y descentralizan más la red de suministro. Sin embargo, en el futuro un gran número de estas centrales equipadas con nuevos sistemas de control inteligente de la red y sistemas de almacenamiento de energía, como el almacenamiento bombeado y las baterías avanzadas, podrán desplazar a las centrales convencionales, de mayor tamaño. Por consiguiente, las alternativas convencionales para los sistemas de energía renovable deberán incluir todas las opciones posibles para la localidad. Se deben usar los factores adecuados tanto de capacidad como de eficacia máxima para determinar el tamaño equivalente del proyecto convencional y después proyectar a escala los efectos y beneficios de una central de tamaño típico.

Por ejemplo, un proyecto eólico de 100 MW con un factor de capacidad de 36 por ciento equivaldría a 50 MW de capacidad nuclear con un factor de 72 por ciento,<sup>55</sup> y 43 MW de capacidad carboeléctrica con un factor de 85 por ciento.

## **Paso 3: Usar los cuadros 1 y 2 para calcular los beneficios del proyecto de energía renovable**

El cuadro 1 se puede usar para identificar y, cuando es posible, calcular la magnitud de los efectos de una central convencional que se evitan con la central de energía renovable por cada una de las cinco categorías

---

<sup>55</sup> Porcentaje típico para centrales nucleares ubicadas en Ontario considerando interrupciones del suministro eléctrico no programadas y reparaciones.

de efectos. Ajustados de acuerdo con el tamaño de la central de energía renovable, se convierten en los beneficios no-atmosféricos del proyecto de energía renovable.

Si el proyecto de energía renovable no pudiera cumplir con los estrictos criterios fijados para ese tipo de proyecto, entonces será necesario contrastar cualesquier efectos negativos identificados en el cuadro 2 y estos beneficios.

#### **Paso 4: Calcular con mayor rigor los beneficios no-atmosféricos mediante una evaluación basada en criterios múltiples**

Con base en la evaluación anterior de las metodologías que se pueden aplicar para comparar las fuentes de energía convencionales y renovables del apartado 3, se recomienda usar un enfoque de evaluación basado en criterios múltiples para hacer un cálculo más riguroso de los beneficios no-atmosféricos y clasificarlos. El enfoque de atributos múltiples es más adecuado cuando se dispone de menos cálculos cuantitativos y los beneficios (efectos) varían en gran medida como sucede con los beneficios no-atmosféricos.

La evaluación de criterios múltiples también ofrece la oportunidad de que participen formalmente una amplia gama de sectores interesados, además de que permite la inclusión de otras consideraciones comparativas, incluidos efectos sociales, económicos y relacionados con emisiones de diferentes fuentes de energía.

#### **Paso 5: Valuar los beneficios**

Si se han cuantificado suficientes beneficios, entonces la valuación monetaria de estos beneficios aportará datos de entrada adicionales para la evaluación de criterios múltiples, de modo que los participantes podrán emitir juicios más fundamentados sobre la importancia de cada beneficio. También permitirá comparar los beneficios monetarios aplicando los enfoques de evaluación contingentes descritos en el apartado 4.

## 6.0 Conclusiones y recomendaciones

### 6.1 Conclusiones

Se dispone de muy pocas mediciones cuantitativas de los efectos ambientales no-atmosféricos para fuentes de energía eléctrica, ya sea convencionales o renovables. La superficie de suelo usada por MW es la excepción, pero las grandes diferencias en los tipos de efectos en el suelo limitan la utilidad de muchas de estas mediciones.

Muchos de los efectos no-atmosféricos de las fuentes de energía eléctrica convencionales y renovables son exclusivos de una fuente en particular, lo que dificulta comparar las distintas fuentes e identificar los beneficios. Por ejemplo:

- Los considerable efectos visuales de los proyectos eólicos.
- La capacidad para instalar sistemas solares fotovoltaicos en estructuras existentes, sin ocupar nuevas superficies.
- Los importantes efectos relacionados con la radiación y los residuos de larga duración de la energía nuclear.

Salvo por lo que toca a plantas de energía hidroeléctrica, son pocos los ejemplos de centrales eléctricas de gran escala basadas en energía renovable que sean equivalentes en tamaño a una central nuclear o carboeléctrica típica y sirvan para cuantificar los efectos ambientales. Con todo, las tecnologías de energía eléctrica tanto convencional como renovable están evolucionando rápidamente (tal es el caso del almacenamiento de energía de origen eólico, y la generación limpia a base de carbón), por lo que la evaluación de beneficios adquiere relevancia estratégica.

En términos generales, si las fuentes de energía renovable cumplen con las directrices de sustentabilidad formuladas y aplicadas por organismos que gozan de reconocimiento internacional, puede entonces darse por sentado que se trata de proyectos con efectos ambientales reducidos. Por tanto, los beneficios de estos proyectos son los efectos evitados de los sistemas de generación eléctrica convencionales a los que desplazan.

Los beneficios más importantes de las fuentes de generación eléctrica renovables son el impacto negativo que evitan en la calidad del agua, la menor cantidad de residuos sólidos y los daños evitados a la biodiversidad, todos efectos derivados de las centrales carboeléctricas y nucleares.

Dada la falta de datos cuantitativos y las considerables discrepancias en el tipo de efectos no-atmosféricos de las fuentes de energía, la única manera eficaz de calcular con rigor los beneficios de un proyecto de energía renovable es aplicar una evaluación basada en criterios múltiples, donde diversas ponderaciones subjetivas se comparan y analizan rigurosamente.

Los cálculos monetarios de los efectos ambientales no-atmosféricos de las fuentes de energía renovable en la actualidad se limitan a medir los costos abatidos de los sistemas de energía no renovable alternativos. A este respecto, el aspecto más prometedor parece ser la valuación monetaria de la pérdida de ecosistemas evitada. En todo caso, lo que resulta evidente es que la gente valora mucho la energía renovable.<sup>56</sup>

---

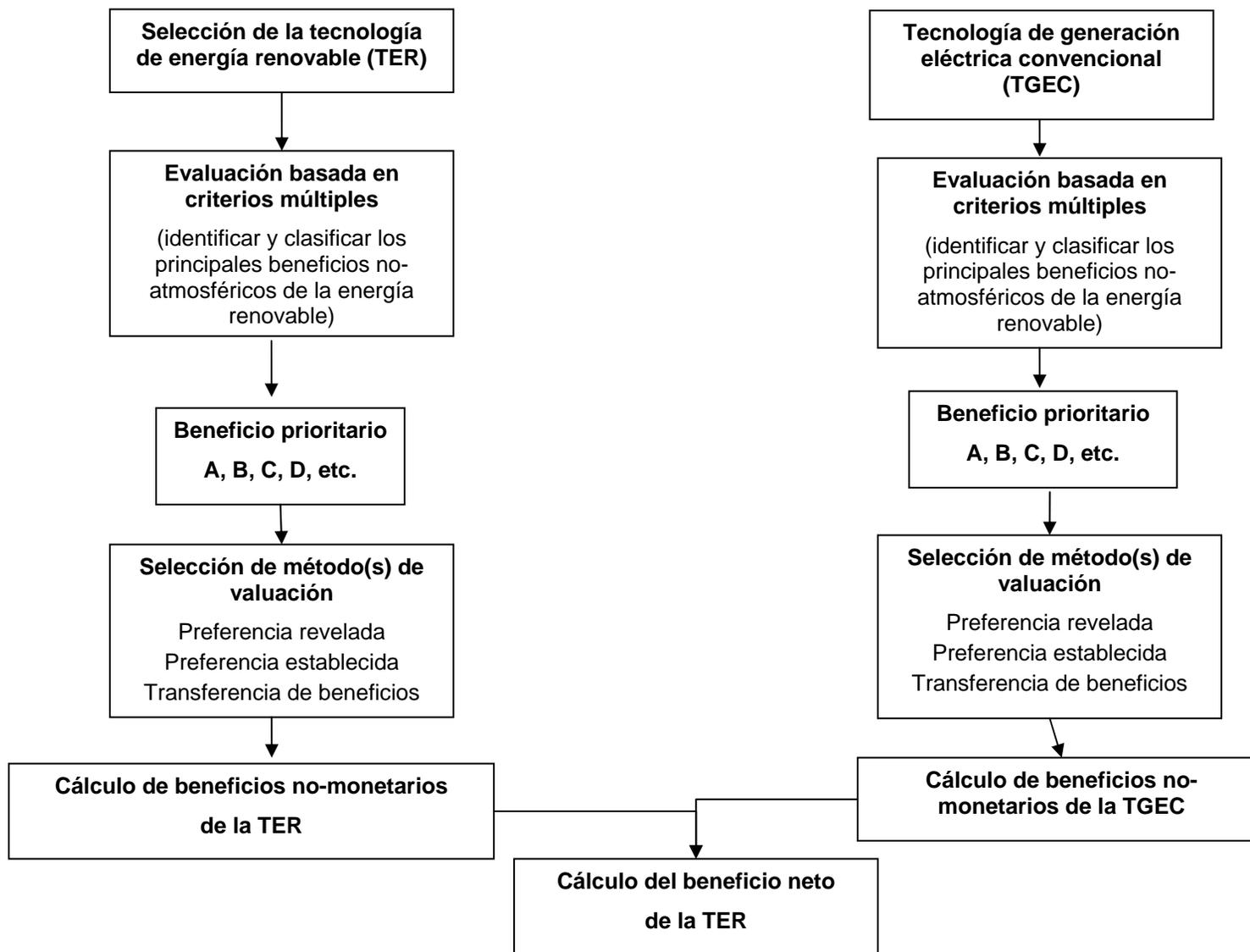
<sup>56</sup> Ryan Wiser, "Using contingent valuation to explore willingness to pay for renewable energy: A comparison of collective and voluntary payment vehicles", *Ecological Economics*, vol. 62, 2007, pp. 419-432.

## 6.2 Recomendaciones

Se necesita un grado considerable de investigación y análisis para evaluar en toda su dimensión el valor que la transición de sistemas de energía eléctrica convencionales a los basados en energía renovable entraña tanto para las personas como para los ecosistemas. Durante la investigación realizada para este informe, resultó evidente que hay varios aspectos fundamentales donde se requiere trabajo adicional, a saber:

- Una mayor investigación para identificar medidas cuantitativas de los beneficios ambientales no-atmosféricos en zonas donde resulte posible efectuar comparaciones reales entre las distintas fuentes de energía eléctrica en cuanto a beneficios relacionados con el consumo de agua y el uso de suelo.
- La formulación de criterios de sustentabilidad para los sistemas de generación eléctrica basados en energía mareomotriz, del oleaje y el biogás.
- La aplicación piloto de una evaluación basada en criterios múltiples de todos los efectos ambientales (incluidos los no-atmosféricos) para varias fuentes de generación eléctrica convencionales y renovables que podrían satisfacer la misma demanda de nueva energía eléctrica.
- La elaboración de un marco al que deban apegarse los promotores de proyectos de energía renovable para evaluar los beneficios ambientales no-atmosféricos de su sistema.
- La elaboración de un marco para que los responsables de la formulación de políticas valúen los beneficios no-atmosféricos relacionados con la energía renovable, en comparación con los de sistemas de energía convencional, y para monetizar eficazmente estos beneficios. Véase el marco recomendado a continuación.
- La aplicación de marcos semejantes a algunos proyectos en operación, en los que sea posible obtener datos suficientes sobre el sistema de energía renovable y las alternativas a la generación convencional.

**Marco para evaluar los beneficios no-atmosféricos derivados de los sistemas de energía renovable,  
en comparación con los basados en fuentes de energía tradicionales, y para monetizar estos beneficios**



# Apéndice 1: Cálculo de los efectos de las tecnologías convencionales

*Nota:* Las cursivas indican la traducción de citas textuales de apartados pertinentes en las fuentes de información.

## Carbón

*Los efectos ambientales vinculados con el uso del carbón como fuente de energía son extensos e incluyen degradación de los ecosistemas, modificación de las corrientes características de aguas superficiales y freáticas, generación de residuos y efluentes, y emisiones atmosféricas. Los efectos dependen de varios factores, como el tipo de carbón, la ubicación de la veta de carbón, los métodos de extracción y procesamiento, y la tecnología de combustión.*<sup>57</sup>

## Minería

La minería a cielo abierto se usa para extraer más de 90 por ciento del carbón en Canadá. En promedio, los efectos directos en el suelo se extienden a 335 ha por mina, lo que ocasiona la destrucción y fragmentación de los hábitats. No es rara la afectación de los corrientes características de las aguas superficiales, ni tampoco la sedimentación corriente abajo. La eliminación de sobrecarga y las aguas de drenaje de minas pueden afectar mucho la cantidad y la distribución de las aguas freáticas: en algunas ocasiones el agua de drenaje ha destruido algunos suministros de agua viables para residencias rurales a causa del desagüe de acuíferos.<sup>58</sup>

El Servicio de Estudios Geológicos de Estados Unidos (*US Geological Survey*) calcula que la producción de sedimento de las porciones dedicadas a la minería a cielo abierto de una cuenca hidrográfica puede ser de 10 a 1,500 veces la cantidad que se produce en un suelo que no ha sufrido alteraciones. Se generan grandes cantidades de residuos sólidos durante las etapas de extracción y limpieza (lavado). Alrededor de 19 por ciento de todo el carbón crudo extraído en Canadá se convierte en material de residuo y se descarga como escoria.<sup>59</sup> La minería a cielo abierto constantemente modifica grandes extensiones de suelo. Entre 1930 y 2000, la minería de carbón afectó aproximadamente 2.4 millones de hectáreas en Estados Unidos, gran parte de las cuales fueron bosques alguna vez.<sup>60</sup>

*Además de las minas antiguas abandonadas, las minas de carbón que en la actualidad abastecen a las centrales eléctricas afectan alrededor de 680,000 hectáreas. La primera vez que la Oficina de Minería de Superficie (Office of Surface Mining, OSM) del Departamento del Interior de Estados Unidos reunió*

---

<sup>57</sup> John Cuddihy *et al.*, "Energy use in Canada: environmental impacts and opportunities in relationship to infrastructure systems", *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 32, 2005. Disponible en línea, en: <<http://pubs.nrc-cnrc.gc.ca/rp/rppdf/104-100.pdf>> (consulta realizada en diciembre de 2007).

<sup>58</sup> Earle Ripley y Robert Redmann, *Environmental Effects of Mining*, CRC, Boca Raton, Florida, 1996.

<sup>59</sup> *Ibid.*

<sup>60</sup> Jeff Skousen, Paul Ziemkiewicz y Christina Venable, *Evaluation of Tree Growth on Surface Mined Lands in Southern West Virginia*, Arch Coal, Virginia Occidental, 1998.

registros voluntarios de los estados y las comunidades indígenas sobre zonas afectadas por la minería de carbón fue en 1998.<sup>61</sup>

De acuerdo con los datos más recientes de la EIA, las entidades que presentaron registros representaban apenas 60 por ciento de la producción total de carbón de Estados Unidos. La superficie afectada correspondiente a los estados que no presentaron registros se calcula en términos generales a partir de su producción de carbón en 1997, como una fracción de la producción total de Estados Unidos. El resultado multiplicado por 85 por ciento arroja la parte de la producción de carbón estadounidense que abastece a centrales eléctricas.<sup>62</sup>

La cantidad de residuos generados depende mucho del tipo de carbón: el carbón bituminoso genera las cantidades más importantes de residuos. Por otro lado, la composición de los metales traza del carbón depende mucho del grado de pureza y la región.<sup>63</sup> Los metales y otros elementos traza constituyen un elemento de preocupación en lo relativo a las descargas de aguas residuales, filtraciones de los tajos abiertos, acumulaciones, tiraderos de residuos de roca y emisiones de polvo. Las descargas y las filtraciones también pueden contener altos niveles de nitrógeno, sobre todo derivado de los explosivos (nitrato de amonio) y el combustóleo. Las características de las aguas residuales son muy variables según su composición química, pH, composición de solutos y sólidos suspendidos totales (SST); en general, se requiere un tratamiento antes de la descarga. A menudo hay metano dentro de las vetas de carbón, el cual se emite a la atmósfera durante las excavaciones.<sup>64</sup>

Es necesaria una comprensión sistémica de las emisiones de contaminantes y el uso de energía al considerar procesos para reducir emisiones o aumentar la eficiencia de la combustión. Dependiendo del proceso de tratamiento, transferir azufre del carbón comercializable a la corriente de residuos sólidos puede convertir un posible problema de emisiones atmosféricas en un problema de drenaje ácido.

### **Generación eléctrica**

Las centrales termoeléctricas que usan carbón pueden generar cantidades considerables de residuos sólidos, en forma tanto de lodos derivados de la desulfuración de gases de combustión como de cenizas volantes y de fondo. Dependiendo de la calidad y el tipo de combustible, los residuos sólidos pueden contener sustancias tóxicas, materiales peligrosos o radiactivos. Por otro lado, dependiendo de la composición del carbón utilizado, tan sólo la eliminación de las cenizas residuales puede requerir más de un acre [casi media hectárea] por MW de capacidad instalada.<sup>65</sup>

Se ha calculado que los efectos físicos directos de la generación, sin incluir la minería de combustibles, se extienden en alrededor de 7.68 hectáreas por MW de capacidad.<sup>66</sup>

---

<sup>61</sup> Office of Surface Mining, 1998 Annual Report, disponible en línea, en: <[www.osmre.gov/anrep98.htm](http://www.osmre.gov/anrep98.htm)>.

<sup>62</sup> Datos de <[www.eia.doe.gov/cneaf/coal/statepro/tables](http://www.eia.doe.gov/cneaf/coal/statepro/tables)>, <[www.eia.doe.gov/cneaf/coal/quarterly/html/t3p01p1.html](http://www.eia.doe.gov/cneaf/coal/quarterly/html/t3p01p1.html)> y <[www.eia.doe.gov/cneaf/coal/quarterly/html/t37p01p1.html](http://www.eia.doe.gov/cneaf/coal/quarterly/html/t37p01p1.html)>, en Adam Serchuk, *op. cit.*

<sup>63</sup> Earle Ripley y Robert Redmann, *op. cit.*

<sup>64</sup> John Cuddihy *et al.*, *op. cit.*

<sup>65</sup> Banco Mundial, *India: Strengthening Institutions for Sustainable Growth – Country Environmental Analysis*, 2005. Disponible en línea, en: <[siteresources.worldbank.org/INDIAEXTN/Resources/295583-1176163782791/ch2.pdf](http://siteresources.worldbank.org/INDIAEXTN/Resources/295583-1176163782791/ch2.pdf)> (consulta realizada en diciembre de 2007).

<sup>66</sup> <[www1.eere.energy.gov/geothermal/printable\\_versions/geopower\\_landuse.html](http://www1.eere.energy.gov/geothermal/printable_versions/geopower_landuse.html)>.

## Gas natural

Las emisiones al agua atribuidas a la producción son principalmente el resultado de la descarga de aguas de producción (fluido inyectado durante la excavación). La toxicidad de estos fluidos de excavación es sumamente variable, dependiendo de su formulación. Se usa agua como fluido base en aproximadamente 85 por ciento de las operaciones de excavación en el mundo y en el 15 por ciento restante se usa sobre todo aceite. Las aguas de producción contienen varios contaminantes, entre ellos, elementos y metales traza de las formaciones por las que circuló agua durante las excavaciones, así como aditivos y lubricantes, necesarios para una operación apropiada.<sup>67</sup> Por lo general, estas aguas se tratan antes de la descarga, aunque no siempre fue así.<sup>68</sup> Los derrames sólo representan un pequeña parte de las descargas acuáticas.<sup>69</sup> La información estadística tiende a centrarse en los efectos ambientales relacionados con las descargas de la industria y no en los efectos ecológicos, que incluyen destrucción y fragmentación de hábitats; sin embargo, estos efectos se deben reconocer como preocupaciones importantes vinculadas con los proyectos de extracción de petróleo y gas natural en ambientes tanto terrestres como acuáticos.<sup>70</sup>

Las centrales que usan gas como combustible casi no producen residuos sólidos.<sup>71</sup>

## Nuclear

### Uso del suelo

La Comisión de Desarrollo Sustentable calcula que el suelo utilizado para una central nuclear de 1,000 MW oscila entre 100 y 400 hectáreas.<sup>72</sup>

Hay otros efectos ambientales atribuibles a la generación eléctrica nuclear que pueden derivarse de la radiación, los accidentes, las emisiones atmosféricas y las tomas de agua durante la operación y la eliminación del combustible procesado. Los siguientes ejemplos se tomaron de un análisis reciente del ciclo de combustible nuclear y electricidad realizado por The Pembina Institute.<sup>73</sup>

### Minería y procesamiento del uranio

- Alrededor de 575,000 toneladas al año, de las cuales entre 90,000 y 100,000 se pueden atribuir a la producción de uranio para fines de generación de energía doméstica. La escoria del procesamiento del uranio es ácida o puede ser generadora de ácido, además de contener diversos radionucleidos de larga duración, metales pesados y otros contaminantes. La generación de escoria podría aumentar proporcionalmente con el uso de minerales de uranio de

---

<sup>67</sup> John Cuddihy *et al.*, *op. cit.*

<sup>68</sup> A.B. Doyle *et al.*, "Drilling and production discharges in the marine environment", en S.T. Orszulik (comp.), *Environmental technology in the oil industry*, Blackie Academic & Professional, Londres, 1997, citado en John Cuddihy *et al.*, *op. cit.*

<sup>69</sup> Paul Liu, *Introduction to energy and the environment*, Van Nostrand Reinhold, Nueva York, 1993.

<sup>70</sup> John Cuddihy *et al.*, *op. cit.*

<sup>71</sup> James Fay y Dan Golomb, *Energy and the environment*, Oxford University Press, Nueva York, 2002, citado en John Cuddihy *et al.*, *op. cit.*

<sup>72</sup> Comisión de Desarrollo Sustentable, *op. cit.*

<sup>73</sup> Mark Winfield *et al.*, *Nuclear Power in Canada: An Examination of Risks, Impacts and Sustainability*, The Pembina Institute, Toronto, 2006. Disponible en línea, en: <[www.pembina.org/pub/1346](http://www.pembina.org/pub/1346)>.

menor grado de pureza, pues se deben procesar mayores cantidades de mineral para producir la misma cantidad de concentrado de uranio.

- Hasta 18 millones de toneladas de residuos de roca, que también pueden contener radionucleidos y metales pesados, y ser generadores de ácido. De este total, hasta 2.9 millones de toneladas se pueden atribuir a la minería de uranio para fines de generación de energía doméstica.
- Se calcula que hay más de 213 millones de toneladas de escoria de minería de uranio en instalaciones de almacenamiento en Canadá y 109 millones de toneladas de residuos de roca.

### **Operaciones de refinación y conversión**

- Se calcula que al año se generan casi mil toneladas de residuos sólidos y 9,000 m<sup>3</sup> de líquidos residuales como resultado de la refinación y conversión de uranio y la producción de combustible para fines de generación de energía doméstica. No se logró obtener información sobre las características y el destino precisos de estos residuos.

### **Operación de centrales eléctricas**

- Cada año, los reactores nucleares canadienses generan aproximadamente 85,000 ensambles de combustible residuales. En 2003 había 1.7 millones de ensambles almacenados en los emplazamientos de los reactores. Se calcula que estos residuos deberán resguardarse durante aproximadamente un millón de años por razones de seguridad, ambientales y de prevención.
- Cada año en Ontario se generan alrededor de 6,000 toneladas de residuos radiactivos de menor nivel, como resultado de las operaciones, mantenimiento y acondicionamiento de las centrales eléctricas.
- El mantenimiento y acondicionamiento de las centrales eléctricas también generan cantidades considerables de residuos peligrosos adicionales, incluidos metales pesados y asbesto.
- Se producirán cantidades muy grandes de residuos radiactivos de nivel bajo, intermedio y alto como consecuencia del cierre, a la larga, de instalaciones refinación, conversión y fabricación, así como de centrales eléctricas. El costo de cerrar los reactores que ahora existen en Ontario se calcula en torno de 7,474 millones de dólares (el valor actual es de \$6,263 millones).

*Las preocupaciones respecto al consumo y descarga de agua son similares a los relacionados con las centrales termoeléctricas. Los peces, al igual que otra biota acuática, pueden chocar contra los filtros y resultar arrastrados a causa de las tomas de las termoeléctricas, mientras que la contaminación térmica provocada por la descarga de vapor condensado puede dañar los ecosistemas acuáticos.<sup>74</sup>*

*La eliminación del combustible usado muchas veces se considera el principal efecto ambiental en potencia de la industria de la generación eléctrica nuclear. Las dificultades con las prácticas de manejo a largo plazo, como la eliminación geológica profunda, incluyen riesgos vinculados con una posible corrosión de los contenedores de combustible, la disolución del uranio, y la liberación y migración de radionucleidos.<sup>75</sup> Las incertidumbre se relacionan sobre todo con las características del sitio: caudal de*

---

<sup>74</sup> John Cuddihy et al., *op. cit.*

<sup>75</sup> Donald Wiles, *The Chemistry of Nuclear Fuel Waste Disposal*, Polytechnic International Press, Montreal, 2002.

agua, dirección y composición química a profundidad, tipo e integridad de las rocas a profundidad. Aunque no se han materializado los efectos ambientales ocasionados por la eliminación de combustible usado, hay un considerable riesgo percibido y resulta difícil predecir los efectos a largo plazo.<sup>76</sup>

### **Generación termoeléctrica (aplicable a todos los generadores térmicos de paso único)**

*El consumo de agua y la contaminación térmica guardan una estrecha relación. La Oficina de Estadísticas de Canadá ha demostrado que la generación eléctrica a partir de energía nuclear y la basada en combustibles fósiles representan, en conjunto, alrededor de 64 por ciento de todas las tomas de agua del país. El agua se usa a fin de formar vapor para impulsar las turbinas, luego de la cual se condensa y el calor residual (que constituye alrededor de un tercio de la energía del combustible) se transfiere a un depósito frío. De acuerdo con Ontario Power Generation (OPG), casi toda el agua consumida tanto por las centrales eléctricas nucleares como por las basadas en combustibles fósiles se usa en procesos de enfriamiento de paso único. Por tanto, la contaminación térmica es el resultado de reintroducir esta agua en su cuerpo de origen.*

*En 1996 el consumo neto de agua, es decir, el agua no devuelta a su cuerpo de origen, representó aproximadamente 10 por ciento de todo el consumo nacional de agua. Por último, en algunos casos, las tomas de agua de mayor escala pueden ocasionar daños a los peces y otras formas de vida acuática a causa de los choques contra los filtros y el arrastre.<sup>77</sup>*

Los efectos negativos en la calidad del agua son resultado de los contaminantes y de cambios importantes en la temperatura del agua. Los sistemas de enfriamiento de centrales termoeléctricas grandes como las carboeléctricas, las de ciclo combinado de gas natural y las nucleares pueden tener importantes efectos adversos en la temperatura del agua local. Algunas centrales son responsables de la muerte de más de un millón de peces por año de operación, en buena medida a causa de los aumentos en la temperatura del agua.<sup>78</sup>

---

<sup>76</sup> John Cuddihy *et al.*, *op. cit.*

<sup>77</sup> *Ibid.*

<sup>78</sup> Adam Serchuk, *op. cit.*

# Apéndice 2: Cálculo de los efectos de las tecnologías renovables

*Nota:* Las cursivas indican la traducción de citas textuales de apartados pertinentes en las fuentes de información.

## **Hidroelectricidad con embalse**

*El desarrollo de la capacidad de generación hidroeléctrica a gran escala suele relacionarse con un breve periodo de efectos más intensivos (construcción) seguido de varios posibles efectos continuos. Los efectos de la construcción tienen que ver sobre todo con la inundación de extensiones de terreno considerables y la emisión de gases de efecto invernadero, mientras que los efectos continuos incluyen el choque y el arrastre de los peces con las turbinas y la alteración de sus rutas migratorias. Además, la construcción de líneas de transmisión y el clareo para las vías de acceso puede ocasionar una degradación o fragmentación importante del hábitat.*

*Los efectos ambientales vinculados con la inundación extensiva necesaria para formar embalses y derivados de la desviación de ríos se cuentan entre los más considerables de los que se atribuyen a los esquemas de generación hidroeléctrica de gran escala. Se desplaza a las especies silvestres locales, se afectan los patrones migratorios y se destruye el hábitat. Además de la alteración física de los caudales corriente abajo, también hay mayores niveles de evaporación debido a la formación de embalses. Se fragmentan los ecosistemas, se altera la calidad del agua corriente abajo y a menudo se produce una mayor sedimentación. La calidad del agua corriente arriba (en el embalse) también puede resultar afectada. En el caso del proyecto hidroeléctrico La Grande en Quebec, por ejemplo, la actividad bacteriana en el suelo y la vegetación inundados tuvo como consecuencia la formación de metilmercurio, forma bioacumulable y tóxica del mercurio.<sup>79</sup>*

*La International Hydropower Association (IHA), asociación de organizaciones e individuos relacionados con la hidroelectricidad en más de 80 países, ha formulado una serie de directrices de sustentabilidad<sup>80</sup> para asegurar la explotación sustentable de los recursos hidroeléctricos. La IHA ha identificado los siguientes efectos posibles de la hidroelectricidad (tomados de las directrices de la IHA).*

### **Calidad del agua**

*Es probable que ocurran cambios en la calidad del agua dentro del proyecto y corriente abajo como consecuencia del embalse. El tiempo de residencia del agua dentro de un embalse es un factor de gran peso que influye en la magnitud de estos cambios, junto con la batimetría, el clima y las actividades en la cuenca. Los principales problemas incluyen oxigenación mermada, temperatura, potencial de estratificación, flujo de contaminantes, propensión a la proliferación de enfermedades, captación de nutrientes, potencial de floraciones de algas y liberación de sustancias tóxicas de los sedimentos inundados.*

---

<sup>79</sup> John Cuddihy *et al.*, *op. cit.*

<sup>80</sup> International Hydropower Association, *Sustainability Guidelines*, febrero de 2004. Disponible en línea, en: <[http://www.hydropower.org/downloads/IHA\\_Guidelines\\_NOV%20%2703Int.pdf](http://www.hydropower.org/downloads/IHA_Guidelines_NOV%20%2703Int.pdf)>.

### **Transporte de sedimentos y erosión**

*La creación de un embalse cambia las características hidráulicas y de transporte de sedimentos del río, lo que aumenta el potencial de sedimentación dentro del embalse e impide que llegue material corriente abajo. La sedimentación es un importante problema de sustentabilidad en algunos embalses y puede reducir la viabilidad de los proyectos a largo plazo. La reducción en la carga de sedimentos que llega corriente abajo del río puede alterar los procesos geomórficos (por ejemplo, causar erosión y modificar la forma de los ríos).*

### **Hidrología corriente abajo y flujo ambientales**

*Los cambios en la hidrología corriente abajo repercuten en la hidráulica del río, en el hábitat dentro del cauce y a los lados, y, en potencia, en la biodiversidad local.*

### **Especies raras y amenazadas**

*La pérdida de especies raras y amenazadas puede representar un problema importante derivado de la construcción de presas. Esto puede ser consecuencia de la pérdida o los cambios en el hábitat ocasionados por las alteraciones durante la construcción de la central o la creación del embalse, los cauces alterados corriente abajo o la mezcla de faunas acuáticas que ocurren con las transferencias de agua entre cuencas. Los proyectos hidroeléctricos modifican los hábitats terrestres y acuáticos.*

### **Tránsito de especies ictiológicas**

*Muchas especies ictiológicas requieren efectuar un tránsito a lo largo de los ríos al menos durante periodos breves de su ciclo de vida. En muchos lugares, la migración de peces es un acontecimiento anual y tanto las presas como otras estructuras dentro de los caudales constituyen importantes barreras para su movimiento. En algunos casos, la sustentabilidad a largo plazo de las poblaciones de peces depende de esta migración y las economías locales de los países en desarrollo pueden depender en gran medida de ello como fuente de ingresos.*

### **Especies de plagas dentro del embalse (flora y fauna)**

*En algunas regiones, un importante problema a largo plazo con los embalses, independientemente de su uso, es la introducción de especies de plagas exóticas o autóctonas. El cambio en el medio ambiente causado por la creación de embalses a menudo propicia una colonización ventajosa por parte de especies aptas para las nuevas condiciones. Es probable que esto derive en efectos biológicos adicionales. En algunos casos, la proliferación puede interferir con la generación eléctrica (por ejemplo, al obstruirse las estructuras de las tomas de agua) o con el uso del agua corriente abajo como consecuencia de los cambios en la calidad del agua descargada (por ejemplo, presencia de toxinas de las floraciones de algas y agua desoxigenada).*

### **Aspectos sanitarios**

*Los cambios ocasionados por los proyectos hidroeléctricos tienen la capacidad de afectar la salud humana. Es necesario considerar los problemas relacionados con la transmisión de enfermedades, los riesgos para la salud humana derivados de la regulación del caudal y el consumo de fuentes de alimento contaminadas (por ejemplo, mayores niveles de mercurio en los peces).*

## Operación de proyectos hidroeléctricos desde el cauce de un río

Las instalaciones hidroeléctricas que no cuentan con embalse, sino que desvían una parte del cauce de un río para la generación eléctrica también pueden tener un efecto ambiental, aunque normalmente es menor que el de un río embalsado. EcoLogo, uno de los programas de etiquetado ambiental más respetados de América del Norte, establece criterios y normas para la certificación de productos en más de cien categorías, entre otros, para la electricidad renovable de bajo impacto. En las directrices de EcoLogo para la hidroelectricidad desde el cauce de un río figuran los siguientes efectos posibles:<sup>81</sup>

- Alteración dañina o afectación del hábitat de los peces
- Menores flujos de agua en los tramos circunvalados que son perjudiciales para las especies autóctonas que habitan ahí
- Flujos dentro del cauce corriente abajo inadecuados para sustentar a las especies autóctonas que habitan ahí
- Cambios en la temperatura del agua perjudiciales para las especies autóctonas que habitan ahí
- Mortalidad de los peces ocasionada por el choque contra los filtros de las tomas de agua y el arrastre, y barreras para el tránsito de los peces

## Sistemas solares fotovoltaicos

No se requieren recursos de suelo para la operación de sistemas solares fotovoltaicos residenciales, que se instalan en estructuras ya erigidas.

Se calcula que el suelo utilizado para sistemas solares fotovoltaicos para suministro público en terrenos no contaminados representa en torno de 2.5 ha/MW.<sup>82</sup> De acuerdo con la Comisión de Energía de California, las instalaciones solares fotovoltaicas requieren aproximadamente 3.6 ha por MW de capacidad.<sup>83</sup>

---

<sup>81</sup> EcoLogo, *Electricity – Renewable Low-impact*, Certification Criteria Document 003. Disponible en línea, en: <source: <http://www.ecologo.org/common/assets/criterias/CCD-003.pdf>>.

<sup>82</sup> Electric Power Research Institute y Office of Utility Technologies, *Energy Efficiency and Renewable Energy* (Departamento de Energía de Estados Unidos), “Renewable Energy Technology Characterizations”, 1997. Disponible en línea, en: <[http://www1.eere.energy.gov/ba/pba/pdfs/entire\\_document.pdf](http://www1.eere.energy.gov/ba/pba/pdfs/entire_document.pdf)> (consulta realizada en diciembre de 2007).

<sup>83</sup> Paul Gipe, *Wind Energy Comes of Age*, John Wiley & Sons, Toronto, 1995, p. 406.

**Cuadro A-1: Sistemas fotovoltaicos de placa plana y película delgada para suministro público: requerimientos de recursos (suelo, agua y materiales críticos)<sup>84</sup>**

Indicador	Unidades	Año de referencia 1997	2000	2005	2010	2020	2030
Suelo	ha/MW	5	4	3	2.5	2.5	2.5
	ha	0.8	9.6	24	40	40	40
Elementos críticos (por ejemplo, In, Se, Ga, Te)	MT/GW p	ND	50	30	20	10	3
Agua	m <sup>3</sup>	cero	cero	cero	cero	cero	cero

*Nota:* Las necesidades de extensión de terreno se determinan calculando la superficie requerida para la instalación de los módulos de células fotovoltaicas a fin de generar la potencia deseada, la cantidad de energía por metro cuadrado de módulos instalados y luego multiplicando esta área por un factor de alrededor de 2.5 para considerar la distribución de los módulos sin que se proyecten sombras. Con una eficiencia de 10 por ciento, un sistema fotovoltaico genera alrededor de 100 W/m<sup>2</sup> de módulos instalados. Incluida la densidad de instalación, esto representa 40 W/m<sup>2</sup> de suelo utilizado. Así pues, un MW requeriría 25,000 m<sup>2</sup> de terreno, o alrededor de 0.025 km<sup>2</sup>. En los primeros años, esperamos una eficiencia del sistema inferior a 10 por ciento (considerando los requisitos mayores en cuanto al suelo), pero para 2010, se da por sentada una eficiencia del sistema superior a 10 por ciento (considerando las cifras menores relativas al suelo utilizado). En algunos casos, los módulos fotovoltaicos se instalarán en techos o puede haber otras aplicaciones duales, lo que reduce aún más los cálculos de suelo utilizado.

### Generadores solares termoeléctricos

En estos sistemas, la radiación solar se concentra para obtener temperaturas altas, por medio de un concentrador de canal parabólico o espejos concentrados en una torre central. Se usa sal fundida u otros fluidos de transferencia de calor para operar los generadores de turbinas de vapor.

#### Derrame del fluido de transferencia de calor

*El fluido de transferencia de calor (FTC) que se usa actualmente en la mayoría de los sistemas de canal parabólico (Therminol VP-1) es un hidrocarburo aromático, el óxido de difenilo. En caso de derrames, el suelo contaminado se remite a una instalación de rehabilitación biológica in situ en donde se usan bacterias autóctonas en el suelo para descomponer el aceite hasta que se reducen las concentraciones de FTC a niveles aceptables. Además de los derrames de líquidos, hay cierto nivel de emisiones de vapor de FTC de los sellos del empaque de las válvulas y las bombas durante la operación normal.<sup>85</sup>*

<sup>84</sup> Electric Power Research Institute y Office of Utility Technologies, Energy Efficiency and Renewable Energy, *op. cit.*

<sup>85</sup> Véase Pilkington Solar International GmbH, *Status Report on Solar Thermal Power Plants*, Colonia, 1996, y R.J. Holl, *Status of Solar-Thermal Electric Technology*, Electric Power Research Institute, 1989.

### Uso del suelo

Las centrales de canal parabólico requieren una superficie considerable de suelo que normalmente no se usa de manera concurrente para otros fines. Los canales parabólicos requieren un terreno nivelado. De acuerdo con un estudio encomendado por el estado de Texas, los requisitos de uso de suelo para las centrales de canal parabólico son menores que para la mayoría de las tecnologías renovables de otro tipo (eólica, biomasa, hidroeléctrica) y también a los de los combustibles fósiles cuando se incluyen requerimientos de minería y perforación.<sup>86</sup> La tecnología de canal actual genera alrededor de 100 kWh/año/m<sup>2</sup> de suelo utilizado.

La Comisión de Energía de California calcula que los tecnologías solares termoeléctricas pueden requerir de 1.6 a 2.0 ha por MW.<sup>87</sup>

### Consumo de agua

Las torres de refrigeración húmeda normalmente se usan con centrales solares termoeléctricas. Si no se dispone de agua adecuada en la central eléctrica, podría usarse un sistema de refrigeración seca por condensador. La refrigeración seca puede reducir hasta 90 por ciento las necesidades de agua; no obstante, cuando se aplica este sistema, cabe esperar que los costos y la merma en el desempeño aumenten cuando menos 10 por ciento los costos nivelados de energía.<sup>88</sup>

Los valores de uso de suelo y consumo de agua presentados en el cuadro 4 siguiente se aplican al segmento solar de la central eléctrica.

**Cuadro A-2: Torre de energía solar: requerimientos de recursos**

Indicador	Unidades	Año de referencia 1997	2000	2005	2010	2020	2030
Suelo	ha/MWh/año	2.7x10 <sup>-3</sup>	1.5x10 <sup>-3</sup>	1.4x10 <sup>-3</sup>	1.3x10 <sup>-3</sup>	1.1x10 <sup>-3</sup>	1.1x10 <sup>-3</sup>
Agua	m <sup>3</sup> /MWh	3.2	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4

**Cuadro A-3: Sistema solar de canal parabólico: requerimientos de recursos**

Indicador	Unidades	Año de referencia 1997	2000	2005	2010	2020	2030
Tamaño central	MW	30	80	161	320	320	320
Suelo	ha/MW ha	2.2 66	2.2 66	3.1 500	3.7 1,190	3.6 1,150	3.4 1,090
Agua	m <sup>3</sup> /MW/año	18,500	14,900	17,500	21,900	21,900	21,900

<sup>86</sup> Texas Renewable Virtus Energy Research Associates, *Energy Resource Assessment: Survey, Overview & Recommendations*, informe preparado para el Texas Sustainable Energy Development Council, 1995.

<sup>87</sup> P. Gipe, *op. cit.*

<sup>88</sup> Electric Power Research Institute y Office of Utility Technologies, *Energy Efficiency and Renewable Energy*, *op. cit.*

## **Energía eólica: en tierra y cerca de la costa**

Los factores de capacidad para la energía eólica son importantes a fin de calcular la capacidad efectiva real de las turbinas instaladas en comparación con la capacidad nominal instalada bruta. Los factores de capacidad promedio por lo general oscilan entre 30 y 40 por ciento dependiendo de la velocidad del viento.<sup>89</sup>

Una vez instalados, los proyectos de energía eólica ofrecen las ventajas de cero emisiones a la atmósfera, al agua y de residuos sólidos. Asimismo, las emisiones totales del ciclo de combustible, incluidas las producidas durante la construcción, la extracción del combustible (nulas en el caso de la energía eólica) y los ciclos de operación, son muy bajas en comparación con todos los combustibles fósiles y muchos otros tipos de tecnologías de generación. Estas ventajas ambientales pueden ayudar a las empresas del sector eléctrico a cumplir con la reglamentación ambiental y satisfacer el deseo de sus clientes de contar con fuentes de energía limpia.

### **Repercusiones en las aves**

*Hay varios posibles efectos localizados a los que prestan mucha atención los responsables de proyectar instalaciones de energía eólica, entre otros, las interacciones con las aves, efectos visuales o estéticos, erosión del suelo alrededor de la base de la turbina o las vías de acceso, y efectos acústicos. Las centrales de energía eólica pueden afectar tanto el hábitat y la vida silvestre locales como a las personas. La magnitud de los efectos derivados de estas cuestiones varía desde inexistentes hasta críticos, dependiendo de las características específicas del emplazamiento de cada proyecto; por ejemplo, la proximidad con poblaciones humanas y de aves, el tipo y uso del suelo circundante, y las preferencias locales para el uso del suelo. Los promotores de proyectos eólicos deben sopesar con cuidado estas características cuando deciden la ubicación de sus proyectos a fin de disminuir los efectos potenciales a niveles aceptables.*

*De los aproximadamente cinco mil millones de muertes de aves al año registradas en Estados Unidos, 200 millones son consecuencia de colisiones con objetos de fabricación humana. La experiencia en la última década ha demostrado que el nivel de mortalidad de aves a causa de la interacción con instalaciones de energía eólica puede variar de cero en algunas zonas a ser preocupante en otras, por ejemplo cuando estas instalaciones se ubican en rutas migratorias o en centros de densa población de aves, como Altamont Pass, California. Las colisiones de aves con estructuras para la generación de energía eólica son la principal causa de mortalidad registrada. Las electrocuciones son la segunda causa más importante, pero se han ideado soluciones para mitigar este problema. Otros factores que influyen en las posibilidades de colisiones de aves con instalaciones de energía eólica incluyen el uso del suelo; el diseño, la ubicación y la orientación de las turbinas; los métodos de operación; las especies de aves; el uso del hábitat, y el comportamiento de las aves para volar y posarse.<sup>90</sup>*

Los investigadores que realizan estudios en instalaciones de energía eléctrica en Estados Unidos y Europa señalan que la mortalidad de aves no se considera biológicamente importante para las poblaciones en general, lo que indica que estos efectos pueden ser inferiores a los de muchos otros objetos de

---

<sup>89</sup> Los factores de capacidad eólica se pueden aumentar mediante el uso de sistemas de almacenamiento de energía eléctrica, pero las repercusiones ambientales de estos sistemas no se abordan en este informe.

<sup>90</sup> Electric Power Research Institute y Office of Utility Technologies, Energy Efficiency and Renewable Energy, *op. cit.*

fabricación humana. Actualmente, en Estados Unidos, la muerte de aves a causa de las turbinas eólicas representan sólo una pequeña fracción del total de muertes de aves antropogénicas, pues se estima que representó menos de 0.003 por ciento del total en 2003.<sup>91</sup>

De acuerdo con un estudio publicado en *Nature*, cada turbina eólica para suministro público ocasiona la muerte de 0.03 aves en promedio al año; desde luego, el tipo de ave que muere es extremadamente importante para determinar el efecto general para la integridad ecológica y la biodiversidad (es decir, la muerte de diez passeriformes como el gorrión doméstico [*Passer domesticus*] es probablemente mucho menos trascendental para la biodiversidad que la muerte de diez aves de especies más vulnerables, como el cóndor de California [*Gymnogyps californianus*]).

Sin embargo, más allá de la magnitud relativa de los efectos de los proyectos eólicos, minimizar los efectos acumulativos en la población de aves sigue siendo un requerimiento crítico para el desarrollo de la energía eólica en el país y en el extranjero.

### **Efectos visuales**

*El efecto visual de las turbinas eólicas puede ser muy aparente. Las turbinas eólicas son estructuras elevadas, a menudo ubicadas en lo alto de cadenas de colinas y montes, y pueden ser visibles a distancias relativamente lejanas. La experiencia demuestra que el diseño de una instalación de energía eólica, así como el color de la turbina y la torre, afectan la sensibilidad estética de algunas personas. Por último, tanto el aire que pasa por las paletas de las turbinas (ruido aerodinámico) como los componentes mecánicos de las turbinas generan ruido. Los ingenieros han logrado mitigar el ruido aerodinámico modificando el diseño; por ejemplo, adelgazando el borde de salida de las paletas y orientado éstas a barlovento de la torre. Como las turbinas emiten cierto ruido, conviene que los promotores de proyectos eólicos consideren la proximidad con zonas residenciales antes de seleccionar su emplazamiento.*<sup>92</sup>

### **Uso del suelo**

No es necesario comprar o arrendar terrenos y dedicarlos exclusivamente a la generación de energía eólica. El arriendo a largo plazo es muy común cuando hay usos concurrentes, como pastoreo, que reducen los costos para el propietario del proyecto, al tiempo que aumenta el valor del terreno para su propietario.

Los cálculos basados en los proyectos existentes indican que las instalaciones de energía eólica pueden ocupar de 5.6 a 40.4 ha por MW dependiendo del diseño del proyecto,<sup>93</sup> aunque sólo de 5 a 10 por ciento de esa superficie usualmente está ocupada por turbinas. En zonas rurales, el resto de la superficie con frecuencia se destina a usos que no entran en conflicto como el pastoreo y la irrigación.<sup>94,95</sup> Sin embargo, el efecto visual de un proyecto de energía eólica depende de toda el área ocupada. El Laboratorio Nacional de

---

<sup>91</sup> Erickson *et al.*, *A Summary and Comparison of Bird Mortality from Anthropogenic Causes with an Emphasis on Collisions*, USDA Forest Service General Technical Report PSW-GTR-191, 2005. Disponible en línea, en: <[www.fs.fed.us/psw/publications/documents/psw\\_gtr191/Asilomar/pdfs/1029-1042.pdf](http://www.fs.fed.us/psw/publications/documents/psw_gtr191/Asilomar/pdfs/1029-1042.pdf)>.

<sup>92</sup> Electric Power Research Institute y Office of Utility Technologies, *Energy Efficiency and Renewable Energy*, *op. cit.*

<sup>93</sup> American Wind Energy Association, <[www.aweo.org/windarea.html](http://www.aweo.org/windarea.html)>.

<sup>94</sup> En 2006, de acuerdo con el trabajo de investigación de Paul Gipe, la superficie ocupada asciende a aproximadamente 20 ha/MW, 50 a/MW o bien 80-100 m<sup>2</sup> de suelo por m<sup>2</sup> de área barrida por rotor. Véase: <[www.wind-works.org/articles/BriefSummaryofWorldWindEnergyStats2006.html](http://www.wind-works.org/articles/BriefSummaryofWorldWindEnergyStats2006.html)>.

<sup>95</sup> Véase: <[www.crest.org/repp\\_pubs/articles/envImp/04impacts.htm](http://www.crest.org/repp_pubs/articles/envImp/04impacts.htm)>.

Energía Renovable de Estados Unidos calcula que la superficie real necesaria para las turbinas eólicas normalmente va de 0.1 a 0.2 ha por turbina. De acuerdo con la Comisión de Desarrollo Sustentable, el suelo utilizado para la generación de energía eólica en tierra es de alrededor de 180 ha por cada 1,000 MW de capacidad.<sup>96</sup>

**Cuadro A-4: Generación eólica: requerimientos de recursos<sup>97</sup>**

Indicador	Unidades	Año de referencia 1996	2000	2005	2010	2020	2030
Tamaño de la instalación de energía eólica	MW	25	37.5	50	50	50	50
Suelo (50 turbinas)							
5 turb x 10 filas	ha/MW ha	33-20 825-500	26-16 975-600	24-15 1200-750	24-15 1200-750	24-15 1200-750	24-15 1200-750
25 turb x 2 filas	ha/MW ha	19-26 475-650	15-21 563-788	14-19 700-950	14-19 700-950	14-19 700-950	14-19 700-950
50 turb x 1 fila	ha/MW ha	29-46 725-1150	23-37 863-1388	21-33 1050-1650	21-33 1050-1650	21-33 1050-1650	21-33 1050-1650
Agua	m <sup>3</sup>	0	0	0	0	0	0

*Nota:* El intervalo corresponde a 2.5 diámetros de rotor (lado) por 20 diámetros (profundidad), y 5 diámetros (lado) por 10 diámetros (profundidad).

### Energía eólica: fuera de costa

Los proyectos de energía eólica fuera de costa tienen un mayor factor de capacidad que aquellos ubicados en tierra, son menos intrusivos visualmente que las turbinas en tierra y permiten usos menos conflictivos (por lo general, los usos de “suelo” marino son más flexibles que el uso de suelo en tierra, donde zonas con un buen potencial eólico pueden entrar en conflicto con otros usos); no obstante, los requisitos de transmisión suelen ser mucho mayores que para la generación eólica en tierra (tendido de cables submarinos).

De acuerdo con un amplio estudio, de ocho años de duración, de la Dirección de Energía y el Departamento de Bosques y Naturaleza, ambos de Dinamarca, las turbinas eólicas fuera de costa tienen efectos extremadamente menores en las especies acuáticas y muy escasos en la mortalidad de aves. La conclusión fue que eran improbables las consecuencias importantes derivadas de proyectos individuales.<sup>98</sup> Con todo, cabe señalar que los impactos acumulativos de las turbinas eólicas fuera de costa siguen estando sujetos a un alto grado de incertidumbre.

<sup>96</sup> Comisión de Desarrollo Sustentable, *op. cit.*

<sup>97</sup> Electric Power Research Institute y Office of Utility Technologies, Energy Efficiency and Renewable Energy, *op. cit.*

<sup>98</sup> Véase: <[http://windpower.utah.edu/pdfs/danish\\_study.pdf](http://windpower.utah.edu/pdfs/danish_study.pdf)>.

## Biomasa

La producción de materias primas para la biomasa usada como combustible y en la generación de calor y electricidad puede tener un efecto importante en el uso de suelo, la biodiversidad y otros efectos ambientales no-atmosféricos. Varias dependencias y organismos han evaluado los posibles efectos de la producción de materias primas para obtener biomasa en la formulación de sus directrices de sustentabilidad. El siguiente es un resumen de los efectos identificados por Eco-Logo<sup>99</sup>, la Federación Nacional para la Vida Silvestre de Estados Unidos,<sup>100</sup> el Foro Brasileño de ONG y Movimientos Sociales (FBOMS)<sup>101</sup> y el Equipo de Tarea sobre la Transición Energética de los Países Bajos.<sup>102</sup>

- Competencia local por el suelo, materias primas, agua y mano de obra relacionados con la producción de alimentos, materiales de construcción, suministro de energía y medicamentos.
- Degradación de la estructura y la fertilidad del suelo y residuos inadecuados de los cultivos.
- Reducción de la biodiversidad biológica, tanto terrestre como acuática, así como de la abundancia y distribución de la vida silvestre.
- Efectos negativos de los monocultivos y el uso de sustancias químicas persistentes.
- Destrucción de bosques primarios, praderas y pastizales autóctonos, u otras zonas de alto valor para la conservación.
- Especies invasoras y variedades de organismos genéticamente modificados.
- Residuos forestales o agrícolas derivados de las operaciones sin prácticas adecuadas de manejo ambiental, o de especies incluidas en los apéndices de la CITES.
- Uso exclusivo de cultivos energéticos dedicados que se derivan de operaciones con un sistema adecuado de manejo ambiental y su respectivo cumplimiento.
- Tasas no sustentables de cosecha que rebasan los niveles que se pueden mantener y que no aplican prácticas adecuadas de manejo ambiental.

Para información adicional, consúltense los siguientes sitios en Internet:

- Mesa Redonda sobre el Aceite de Palma Sustentable, Principios y Criterios para la Producción Sustentable de Aceite de Palma, 17 de octubre de 2005, <[www.rspo.org](http://www.rspo.org)>.
- Foro Alemán de ONG sobre Medio Ambiente y Desarrollo, Mercado Global para la Bioenergía entre la Protección Climática y la Política de Desarrollo, noviembre de 2005, <[www.forumue.de](http://www.forumue.de)>.
- Instituto de Política Agrícola y Comercial, Principios y prácticas de producción sustentable de biomasa, 2003, <[www.iatp.org](http://www.iatp.org)>.
- Red Internacional para la Energía Sustentable: Europa, “*Criteria for Sustainable Use of Biomass Including Biofuels*” (Criterios para el uso sustentable de la biomasa, incluidos los biocombustibles), abril de 2006, <[www.inforse.org/europe](http://www.inforse.org/europe)>.

---

<sup>99</sup> EcoLogo, *op. cit.*

<sup>100</sup> B. Bramble, *Compilation of Issues to be Addressed in Future Principles and Criteria for Sustainable Biofuels*, documento de trabajo, National Wildlife Federation, Washington D.C., 2006.

<sup>101</sup> *Sustainability Criteria and Indicators for BioEnergy*, Fórum Brasileiro de Ongs e Movimentos Sociais para o Meio Ambiente e o Desenvolvimento (FBOMS), febrero de 2006. Véase: <[www.fboms.org.br/gtenergia/energia\\_doc.htm](http://www.fboms.org.br/gtenergia/energia_doc.htm)>.

<sup>102</sup> Hamelinck *et al.*, *Criteria for Sustainable Biomass Production*, Energy Transition Task Force of the Netherlands, 14 de julio de 2006.

- Consejo de Administración Forestal, Principios y criterios para la administración forestal, 1996, <[www.fsc.org](http://www.fsc.org)>.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), Bioenergía, Sustentabilidad, <[http://www.fao.org/nr/ben/ben\\_key1\\_en.htm](http://www.fao.org/nr/ben/ben_key1_en.htm)>.

En el siguiente cuadro se presentan algunos cálculos de los requerimientos de uso de suelo y agua para centrales eléctricas alimentadas con biomasa.<sup>103</sup>

#### **Cuadro A-5: Generación a base de biomasa: requerimientos de recursos**

Indicador	Unidades	Año de referencia 1996	2000	2005	2010	2020	2030
Tamaño central	MW	50	60	100	150	184	184
Suelo							
Central	ha/MW	0.902	0.902	0.902	0.902	0.902	0.902
	ha	45.1	54.1	90.2	135.3	166.0	166.0
Cultivos	ha/MW	487	401	268	268	164	164
	ha	24,350	24,060	26,800	4,200	30,176	30,176
Tasa crecimiento cultivos	Mg/ha/año	11.2	11.2	16.8	16.8	22.4	22.4
Agua para la central	Mm <sup>3</sup> /año	0.808	0.808	1.341	2.012	2.426	2.426
Energía: biomasa	PJ/año	5.35	5.35	8.90	13.34	13.34	13.34
Materia prima: biomasa	Tg/año	0.271	0.271	0.450	0.675	0.675	0.675
Mano de obra							
Cultivo (261 ha/ETC)	ETC	95	95	101	152	114	114
Estación	ETC	22	22	22	30	35	35

*Nota:* ETC se refiere a equivalente de tiempo completo.

#### **Energía geotérmica: hidrotérmica<sup>104</sup>**

Factor de capacidad: 90%+

En estos sistemas, el agua o el vapor calentados geotérmicamente se usan de manera directa para generar electricidad.

#### **Uso de suelo**

*Se requieren 10 ha para una central de 50 MW con ocupación directa para la central eléctrica y alteraciones en la superficie a causa de los pozos y las tuberías. La superficie total del campo de pozos para una central de referencia tipo flash de 50 MW es del orden de 160 ha. Éstos son cálculos derivados de información general y se aplican a los sistemas tipo flash o de ciclo binario.*

<sup>103</sup> Electric Power Research Institute y Office of Utility Technologies, Energy Efficiency and Renewable Energy, *op. cit.*

<sup>104</sup> *Ibid.*

## **Agua**

*El consumo de agua para la central tipo flash dual es prácticamente nulo porque toda la torre de refrigeración se alimenta del vapor condensado, lo que permite que la central cumpla con los requisitos típicos de reinyección de al menos 80 por ciento de los fluidos geotérmicos producidos. Como la central de ciclo binario que se describe aquí se enfría con aire, no consume agua para refrigeración. En el caso de la generación geotérmica e hidrotérmica, las principales preocupaciones ambientales son las posibles emisiones de sulfuro de hidrógeno y la contaminación de suministros de agua dulce con sales geotérmicas. Las emisiones de sulfuro de hidrógeno se mitigan, de ser necesario, con tecnología de control ambiental, mientras que la contaminación de las aguas freáticas se evita aplicando prácticas protectoras de terminación de pozos. En general, son menores las posibilidades de efectos ambientales adversos con la generación hidrotérmica de ciclo binario que con la generación hidrotérmica tipo flash porque los fluidos más calientes usados en las centrales tipo flash tienden a presentar mayores concentraciones de contaminantes químicos que los fluidos calientes usados normalmente en las centrales de ciclo binario. Asimismo, en las centrales de ciclo binario donde se usan sistemas de refrigeración seca, no húmeda, el fluido geotérmico permanece en un sistema cerrado y nunca se expone a la atmósfera antes de ser inyectado de vuelta en el depósito.*

## **Energía geotérmica: roca caliente seca<sup>105</sup>**

Factor de capacidad = 80%+

En estos sistemas se inyecta agua en roca calentada geotérmicamente y el vapor obtenido se usa para generar electricidad.

### **Uso de suelo**

*Se parte del supuesto de que los requerimientos de suelo son similares a los de los sistemas eléctricos hidrotérmicos. Incluye el suelo utilizado para la central eléctrica y las afectaciones en la superficie a causa de los pozos y las tuberías. No se incluyen las vías de acceso al sitio. Los requisitos de suelo por unidad disminuyen con centrales de mayor porte. Por ejemplo, se espera un uso de suelo mínimo en el caso de una central de ciclo binario con el sistema de roca caliente seca: de alrededor de 6.1 ha para una central de 5 MW hasta 10 ha para una de 25 MW. La afectación, la erosión y la sedimentación del suelo, así como los mayores niveles de actividad humana, pueden perjudicar los sistemas biológicos en las inmediaciones de la central y los pozos.*

*También es posible que los proyectos de roca caliente seca ocasionen efectos visuales adversos, que pueden tornarse una preocupación en zonas habitadas y valoradas por su paisaje. Sin embargo, las centrales geotérmicas de ciclo binario son compactas y tienen un perfil muy bajo en comparación con otras plantas industriales.*

### **Consumo de agua**

*Se necesita agua para perforar los pozos profundos de este sistema y fracturar los yacimientos de roca. No se cuantifican aquí los volúmenes requeridos. El pozo “de producción” para alimentar de agua el sistema*

---

<sup>105</sup> *Ibid.*

se perfora antes que los pozos profundos de roca caliente seca, de modo que toda el agua necesaria para el sistema, excepto aquella usada en la perforación, se extrae de ese pozo. La central está diseñada con torres de refrigeración seca, a fin de que la central en sí no tenga un consumo importante de agua. En un sistema con refrigeración seca, toda el agua permanece en un bucle cerrado y nunca se expone a la atmósfera, lo que limita las emisiones a posibles fugas menores de fluido de trabajo alrededor de las válvulas y las uniones de la tubería. Cuando se usa un sistema de refrigeración húmeda, se pierde algo de agua a causa de la evaporación.

Aunque en los sistemas de roca caliente seca se espera alguna pérdida de agua en el yacimiento, la contaminación de las aguas freáticas no constituye una preocupación por dos motivos. En primer lugar, es probable que se use agua dulce en el sistema; en segundo, la profundidad y la impermeabilidad relativa del yacimiento disminuirán las probabilidades de que el agua usada migre a cuerpos de agua dulce someros.

Las fugas en los límites que circundan el yacimiento pueden ir de 5 por ciento a alrededor de 15 por ciento de la tasa del flujo de inyección. El consumo de agua es de alrededor de 2 a 6 m<sup>3</sup>/MWh en un sistema de 30 MW. Son posibles pérdidas mayores dependiendo de la permeabilidad original del yacimiento de roca.

#### **Cuadro A-6: Energía geotérmica (roca caliente seca): requerimientos de recursos**

<b>Indicador</b>	<b>Unidades</b>	<b>Tecnología actual 1997</b>	<b>2020</b>	<b>2030</b>
Tamaño neto central	MW	5.06	14.78	29.57
Requerimiento de suelo	ha/MW ha	1.2 6.1	.55 8.1	.34 10.1
Agua	ha/MW	0.902	0.902	0.902
Tasa de flujo de inyección	ha	45.1	54.1	90.2
Consumo de agua estimado	ha/MW ha	487 24,350	401 24,060	268 26,800

*Notas:*

1. El consumo de agua se basa en una tasa de 5 a 15 por ciento de inyección.
2. Los casos correspondientes a los años 2000-2010 no se incluyen en el cuadro 2 porque todos son de central triple de pozo único, caso similar al de 1997.