



NACIONES UNIDAS



SEDE SUBREGIONAL EN MÉXICO

ANÁLISIS GENERAL DE LAS EXTERNALIDADES AMBIENTALES DERIVADAS DE LA UTILIZACIÓN DE COMBUSTIBLES FÓSILES EN LA INDUSTRIA ELÉCTRICA CENTROAMERICANA

Claudia Octaviano

Este documento fue preparado por la consultora Claudia Octaviano, bajo la supervisión del señor Víctor Hugo Ventura, Jefe de la Unidad de Energía y Recursos Naturales de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe, CEPAL, Sede Subregional en México.

Las opiniones expresadas en este documento son de exclusiva responsabilidad de la autora y pueden no coincidir con las de la Organización.

ÍNDICE

RESUMEN	5
ABSTRACT	6
RESUMEN EJECUTIVO	7
PRESENTACIÓN	9
I. ASPECTOS METODOLÓGICOS	11
A. METODOLOGÍA VÍAS DE IMPACTO	11
1. Primera etapa: caracterización de la fuente emisora	12
2. Segunda etapa: dispersión de los contaminantes y cálculo de concentraciones	12
3. Tercera etapa: evaluación de los impactos	14
4. Cuarta etapa: evaluación monetaria	17
B. METODOLOGÍA SIMPLIFICADA Y MODELO SIMPACTS DEL OIEA	19
C. INCERTIDUMBRES	23
II. INFORMACIÓN PARA LOS MODELOS UTILIZADOS	24
A. CENTRALES DE GENERACIÓN	24
1. Selección de las centrales termoeléctricas	24
2. Datos técnicos de las centrales seleccionadas	28
B. DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES	32
C. FUNCIONES EXPOSICIÓN-RESPUESTA CONSIDERADAS	32
1. Tasas de incremento de riesgo relativo	32
2. Tasas de incidencia y de mortalidad	34
D. COSTOS ECONÓMICOS DE MORBILIDAD Y MORTALIDAD	36
1. Morbilidad	36
2. Mortalidad	39
III. RESULTADOS	41
A. EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LAS EXTERNALIDADES	41
B. EXTERNALIDADES POR EMISIONES DE CO ₂	46
IV. ANÁLISIS DE EXTERNALIDADES EN ESCENARIOS DEL PLAN INDICATIVO REGIONAL DE EXPANSIÓN DE LA GENERACIÓN, 2009-2023 DEL CEAC	48
A. Análisis de escenarios del plan indicativo	49
B. Revisión de los costos de producción de electricidad	50
C. Resultados del plan indicativo y comparación de costos con y sin externalidades	51
D. Análisis detallado de externalidades ambientales del escenario base de LEAP	54
E. Mecanismos para la internalización de los costos ambientales	59
1. Avances en la regulación ambiental para internalizar externalidades	60
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	66
A. Conclusiones	66
B. Recomendaciones	67
BIBLIOGRAFÍA	69
ANEXOS	73
Anexo I Tecnologías de control de emisiones para centrales termoeléctricas	73
Anexo II Comparación de externalidades con otros países	89

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO 1	INFORMACIÓN REQUERIDA POR LAS DIFERENTES VERSIONES DEL MÓDULO AIRPACTS	21
CUADRO 2	CENTROAMÉRICA: CENTRALES TÉRMICAS SELECCIONADAS	28
CUADRO 3	CENTROAMÉRICA: UBICACIÓN DE LAS CENTRALES TERMOELÉCTRICAS Y DENSIDAD DE POBLACIÓN	29
CUADRO 4	INCREMENTO DE RIESGO RELATIVO (IRR) PARA PM ₁₀ DE DIFERENTES REFERENCIAS	33
CUADRO 5	IRR SELECCIONADOS PARA PM ₁₀ , SULFATOS Y NITRATOS	34
CUADRO 6	TASAS DE INCIDENCIA DE MORBILIDAD	35
CUADRO 7	CENTROAMÉRICA: TASAS DE MORTALIDAD POR PAÍS Y GRUPOS POBLACIONALES RESPECTO DE LA POBLACIÓN TOTAL	35
CUADRO 8	MÉXICO Y CENTROAMÉRICA: COSTOS UNITARIOS PARA CASOS DE MORBILIDAD	37
CUADRO 9	PAÍSES SELECCIONADOS: COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE COSTOS	39
CUADRO 10	CENTROAMÉRICA Y MÉXICO: VALOR DE UN AÑO DE VIDA PERDIDO CRÓNICO POR PAÍS	40
CUADRO 11	CENTROAMÉRICA: COSTOS EXTERNOS POR ZONA Y CONTAMINANTE	42
CUADRO 12	CENTROAMÉRICA: COSTO POR TONELADA DE CONTAMINANTE EMITIDA DE CADA CENTRAL	45
CUADRO 13	CASOS EVALUADOS EN LA MODELACIÓN DEL PLAN INDICATIVO REGIONAL	49
CUADRO 14	ESCENARIOS MEDIO Y ALTO DE PRECIOS DE LOS COMBUSTIBLES, 2009-2023	50
CUADRO 15	COSTOS DE GENERACIÓN CON Y SIN EXTERNALIDADES POR ESCENARIO	54
CUADRO 16	CENTROAMÉRICA: COSTOS EXTERNOS POR TONELADA DE CONTAMINANTE	57
CUADRO 17	VALOR PRESENTE NETO DE LOS COSTOS EXTERNOS PARA EL ESCENARIO LEAP, 2010	57
CUADRO 18	CENTROAMÉRICA: ANÁLISIS DETALLADO DE COSTOS EXTERNOS DEL ESCENARIO LEAP, 2010-2025	58
CUADRO AII-1	COSTOS EXTERNOS ESTIMADOS PARA MÉXICO	90
CUADRO AII-2	EXTERNALIDADES AMBIENTALES DE LA ELECTRICIDAD EN EUROPA	91

ÍNDICE DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1	ETAPAS DE LA METODOLOGÍA VÍAS DE IMPACTO	12
GRÁFICO 2	PLUMA GAUSSIANA EN UN SISTEMA DE COORDENADAS ORIENTADO EN LA DIRECCIÓN DEL VIENTO	13
GRÁFICO 3	FUNCIONES EXPOSICIÓN-RESPUESTA	16
GRÁFICO 4	GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN CENTROAMÉRICA, 2008	25
GRÁFICO 5	CONTRIBUCIÓN POR PAÍS A LA GENERACIÓN TÉRMICA EN CENTROAMÉRICA EN 2008	25
GRÁFICO 6	CENTROAMÉRICA: EMISIONES DE CONTAMINANTES PRIMARIOS, 2008	30
GRÁFICO 7	CENTROAMÉRICA: EMISIONES DE CONTAMINANTES PRIMARIOS DE LAS CENTRALES SELECCIONADAS, 2008	31
GRÁFICO 8	CENTROAMÉRICA: EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO DEL SUBSECTOR ELÉCTRICO, 2008	31
GRÁFICO 9	CONTRIBUCIÓN A LAS EXTERNALIDADES DE LOS IMPACTOS SELECCIONADOS, 2008	43
GRÁFICO 10	CENTROAMÉRICA: EXTERNALIDADES POR CADA CONTAMINANTE EMITIDO	44
GRÁFICO 11	CENTROAMÉRICA: RANGO DE INCERTIDUMBRE DE LOS COSTOS EXTERNOS DE CADA CENTRAL	46
GRÁFICO 12	CENTROAMÉRICA: EXTERNALIDADES CONSIDERANDO EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO DE LAS CENTRALES	47
GRÁFICO 13	RESULTADOS DEL PLAN INDICATIVO REGIONAL PARA LA GENERACIÓN EN Twh PARA EL PERÍODO 2010-2023	51
GRÁFICO 14	GENERACIÓN A BASE DE CARBÓN, DIÉSEL O BÚNKER PARA LOS ESCENARIOS DEL PLAN INDICATIVO POR AÑO PARA EL PERÍODO 2010-2023	53
GRÁFICO 15	EXTERNALIDADES EN LOS DISTINTOS ESCENARIOS DEL PLAN INDICATIVO	54
GRÁFICO 16	CENTROAMÉRICA: EMISIONES ESTIMADAS DE CO ₂ PARA EL PERÍODO 2010-2025, SUBSECTOR ELÉCTRICO	55
GRÁFICO 17	CENTROAMÉRICA: EMISIONES ESTIMADAS DE SO ₂ PARA EL PERÍODO 2010-2025, SUBSECTOR ELÉCTRICO	55
GRÁFICO 18	CENTROAMÉRICA: EMISIONES ESTIMADAS DE NOX PARA EL PERÍODO 2010-2025, SUBSECTOR ELÉCTRICO	56
GRÁFICO 19	CENTROAMÉRICA: EMISIONES ESTIMADAS DE PM ₁₀ PARA EL PERÍODO 2010-2025, SUBSECTOR ELÉCTRICO	56
GRÁFICO 20	INTERACCIONES ENTRE LA ECONOMÍA Y EL MEDIO AMBIENTE	60
GRÁFICO 21	EFICIENCIA ECONÓMICA	61
GRÁFICO 22	CRITERIO COSTO-EFECTIVIDAD	62

ÍNDICE DE MAPAS

MAPA 1	CENTRALES ELÉCTRICAS EN CENTROAMÉRICA, 2008	26
MAPA 2	PLANTAS SELECCIONADAS PARA EL ESTUDIO	27

RESUMEN

El propósito de este trabajo es estimar las externalidades de la generación de energía eléctrica a base de combustibles fósiles en los países de Centroamérica.

La evaluación ha partido de los estudios de planificación indicativa del Consejo de Electrificación de América Central (CEAC). Se utilizó la versión simplificada de la Metodología Vías de Impacto del proyecto ExternE de la Unión Europea, así como el modelo *Simplified Approach for Estimating Impacts of Electricity Generation (SIMPACTS)* del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA).

Constituye la primera evaluación de este tipo que se hace para los países centroamericanos. Brinda elementos cuantitativos y cualitativos para iniciar, a nivel del mercado eléctrico regional centroamericano, la discusión de las externalidades ambientales en la producción termoeléctrica a base de combustibles fósiles y aporta elementos para la incorporación de estos temas en la planeación y el desarrollo de la producción de electricidad en la subregión.

Palabras clave: Externalidades, impacto ambiental, generación eléctrica, mercado eléctrico regional centroamericano.

ABSTRACT

The purpose of this study is to estimate the external environmental costs associated with the production of fossil fuels electricity in Central America countries.

The indicative planning of the Central America Council of Electrification (CEAC) was the departure point of the evaluation. The Impact Pathway Methodology (ExternE, project of the European Union) and the Simplified Approach for Estimating model Impacts of Electricity Generation (SIMPACTS) of the International Atomic Energy Agency (IAEA) were used in this assessment.

It constitutes the first evaluation of this type for the Central American regional electricity market. It provides quantitative and qualitative elements to initiate the discussion of the thermoelectrical environmental externalities and for incorporating these issues in the planning and development of electricity production in the subregion.

Keywords: externalities, environmental impact, power generation, Central American regional electricity market.

RESUMEN EJECUTIVO

El propósito del presente trabajo es estimar las externalidades de la generación de energía eléctrica a base de combustibles fósiles en Centroamérica. En la actualidad, la mayor parte de la electricidad en el mundo se genera principalmente con este tipo de combustibles, lo que conlleva impactos locales, regionales y globales, tanto para la salud como para el medio ambiente. El costo de estos impactos, denominado costo externo, no ha sido incorporado al precio de la electricidad en ningún país debido al efecto económico que generaría. Sin embargo, varios países han aprobado normas y regulaciones estrictas para la producción termoeléctrica, algunos de ellos llevan a cabo instrumentos económicos para reducir el impacto del SO₂ y los NO_x, y en la actualidad, se discuten impuestos y penalizaciones a las emisiones de CO₂ (*carbon taxes*).

A fin de evaluar las externalidades de la producción termoeléctrica en Centroamérica, el presente trabajo utilizó la versión simplificada de la metodología “vías de impacto” del proyecto ExternE de la Unión Europea, así como el modelo *Simplified Approach for Estimating Impacts of Electricity Generation* (SIMPACTS) del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). La metodología “vías de impacto” comprende cuatro etapas: caracterización de la fuente emisora, dispersión de los contaminantes y cálculo de concentraciones, evaluación de los impactos, y evaluación monetaria.

En el presente estudio se seleccionaron 25 centrales que contribuyeron con 90% de la generación térmica centroamericana. Entre las centrales seleccionadas se incluyen plantas en Costa Rica, El Salvador, Honduras, Guatemala, Nicaragua y Panamá; el criterio de selección fue la generación de energía durante 2008.

Para aplicar la metodología seleccionada se necesitó una serie de datos técnicos, económicos y de salud, que corresponden a 2008, año del caso base considerado por el Consejo de Electrificación de América Central (CEAC) en su Plan Indicativo de Expansión de la Generación, período 2009-2023. El análisis se limitó a considerar para efectos en la salud las emisiones de partículas de SO₂ y NO_x. Se incluye un costo asociado por emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Se precisa que las externalidades se refieren a los efectos por generación de electricidad, sin las emisiones “corriente arriba”.

Para estimar el impacto en la salud se analizaron los valores de Incremento de Riesgo Relativo (IRR) como resultado del meta-análisis del proyecto Ecosistema Urbano y Salud de los Habitantes de la Zona Metropolitana del Valle de México (ECOURS), así como otras referencias del proyecto ExternE y de la Organización Mundial de la Salud (OMS). Con base en la información analizada se decidió utilizar el IRR de menor valor para cada impacto, con objeto de realizar una estimación conservadora del daño.

Se recurrió también a información sobre los costos de morbilidad y mortalidad. Para el costo de atención a casos de enfermedad se consideraron los valores estimados por el Instituto Nacional de Salud Pública y el Instituto Nacional de Ecología de México. Para la mortalidad se utilizó el enfoque de Años de Vida Perdidos (AVP) del proyecto ExternE y el valor estimado para México de Voluntad a Pagar (VP) por reducir el riesgo de un caso de mortalidad. El valor mexicano fue transferido a los distintos países centroamericanos mediante la relación de la paridad del poder adquisitivo del ingreso nacional bruto per cápita con respecto al de México.

La estimación de los costos externos conlleva un nivel de incertidumbre que puede ser alto debido a la cantidad de variables involucradas y a los diferentes supuestos planteados, particularmente con respecto a los efectos de los contaminantes en la salud y a los costos asignados para cuantificar los casos de morbilidad y mortalidad. Influye también el insuficiente conocimiento sobre determinadas variables y procesos involucrados, así como errores en los datos, entre otros.

La aplicación del modelo SIMPACTS proporcionó información del valor de las externalidades por efectos en la salud. Los costos externos de las plantas seleccionadas, en 2008, son del orden de los 20,3 millones de dólares¹ anuales. Este monto equivale a 0,02% del PIB de los países en el año de referencia. Cuatro termoeléctricas presentaron las mayores externalidades (cada una superó los 1,5 millones de dólares).

Se encontró que las emisiones de SO₂ arrojan los mayores costos externos (59%), seguidas de las partículas (29%) y finalmente los NO_x (12%). La internalización de las externalidades en el precio de la electricidad implicaría aumentos de entre 0,09 y 0,27 centavos de dólar por kWh, es decir, entre 1,83% y 5,35% del costo del kWh. El costo externo ponderado, en función de la generación de las 25 centrales de producción, sería de 0,14 centavos de dólar por kWh. Si se incluye el impacto del cambio climático, calculado indirectamente mediante un precio de referencia de 20 dólares por tonelada de CO₂², el costo de las externalidades se elevaría entre 0,87 y 2,32 centavos de dólar por kWh. El promedio ponderado por la generación de las centrales analizadas, si se consideran los impactos locales y regionales por contaminantes primarios y secundarios y el impacto por GEI, es de 1,57 centavos de dólar por kWh.

Con la estimación de externalidades ambientales para 2008 se realizó un análisis prospectivo de las externalidades ambientales de los contaminantes emitidos por el subsector electricidad en Centroamérica con información del CEAC, contenida en su Plan Indicativo Regional de Expansión de la Generación Período 2009-2023, que constituye la última actualización de la información técnica que sustenta *Estrategia Energética Sustentable Centroamericana 2020*. Se encontró que las externalidades ambientales incrementan el costo de los planes de generación entre 8% y 10,6%, considerando los impactos globales del cambio climático y los locales y regionales en la salud. Además, se realizó un análisis detallado de las externalidades en el escenario base con información proveniente del modelo LEAP (*Long range Energy Alternatives Planning System*) para el período 2010-2023. Se estimó que se tendrá un costo externo anual promedio de 307,2 millones de dólares por externalidades asociadas al cambio climático y 44,3 millones de dólares promedio anual por externalidades vinculadas con impactos en la salud. Las externalidades locales y regionales corresponden a estimados conservadores tanto por los supuestos considerados como porque incluyen únicamente impactos en la salud, a los que deben sumarse los impactos en los ecosistemas.

¹ Siempre se referirá a dólares de 2008.

² Este costo se considera en la *Estrategia Energética Sustentable Centroamérica 2020* con fines analíticos.

PRESENTACIÓN

La Sede Subregional de la CEPAL en México, por medio de la Unidad de Energía y Recursos Naturales (UERN), brinda asistencia técnica a los países centroamericanos en temas relacionados con energía, desarrollo sustentable e integración energética. Estos temas se desarrollan por medio de estudios específicos, tanto del programa regular de la CEPAL como de proyectos extrapresupuestarios, con la prioridad de enfocarse en los países atendidos por esta Sede Subregional. En 2006 y 2007 la UERN realizó diversos estudios y actualizó bases de datos energéticas, con el fin de generar la base para preparar la *Estrategia Energética Sustentable Centroamérica 2020 (Estrategia 2020)*, aprobada en noviembre de 2007 por los Ministros de Energía y/o los Ministros encargados del sector energía. Para la estrategia se tomó en cuenta una serie de factores, como las fuentes energéticas disponibles en el mundo, los compromisos internacionales, la sustentabilidad (o sostenibilidad) del sector, la situación económica y social de los países centroamericanos, el sistema energético actual, las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y el ámbito institucional subregional, entre otros.

Los escenarios de expansión de la industria eléctrica utilizados en la *Estrategia 2020* fueron construidos con base en los estudios, recientemente actualizados, del plan indicativo regional de Centroamérica realizados por el Consejo de Electrificación de América Central (CEAC). Los escenarios estudiados consideran diferentes grados de penetración de las Fuentes Renovables de Energía (FRE), que en todos los casos se complementa con una participación significativa de la producción eléctrica a partir de combustibles fósiles. Ante la próxima entrada en operación del Mercado Eléctrico Regional (MER)³ y de acuerdo con los principios sobre los que se sustenta dicho mercado⁴ surgen las preguntas relacionadas con una competencia justa entre las distintas fuentes de producción de electricidad y la conveniencia de internalizar los costos ambientales asociados, tanto a nivel de los mercados nacionales, como del MER.

A tres años de la aprobación de la *Estrategia 2020* y ante los nuevos desafíos que enfrentan los países —en especial los se derivarán de los acuerdos para reducir la emisión de GEI en el marco de las negociaciones de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático—, es conveniente actualizar los diversos estudios que sustentan la estrategia, particularmente los relacionados con los programas de eficiencia energética y las fuentes renovables.

El presente estudio tiene por objeto brindar elementos cuantitativos y cualitativos para iniciar, a nivel del MER centroamericano, la discusión de las externalidades ambientales en la producción de electricidad y aportar elementos para que estos temas puedan ser incorporados gradualmente en la planeación y el desarrollo de la industria eléctrica centroamericana. En los primeros meses de 2010 se presentó al CEAC una primera versión de este documento y se discutió con los integrantes del Grupo de Planificación Indicativa de dicho organismo. Los comentarios y las observaciones surgidas en dichas reuniones se incluyeron en la nueva versión del documento.

El informe comprende cuatro capítulos. En el primero se expone la metodología utilizada, vías de impacto, así como el modelo SIMPACTS del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). En el segundo se sistematiza la información técnica de las centrales termoeléctricas seleccionadas, así como la información de carácter ambiental, económico y de efectos en la salud requerida por la metodología. En el capítulo III se presentan los resultados de las externalidades por planta, un análisis comparativo por país e indicadores para la región. Las conclusiones se exponen en el capítulo cuarto.

³ Que iniciará a operar en el segundo semestre de 2012 con la puesta en marcha del Sistema de Interconexión Eléctrica para los países de América Central (SIEPAC).

⁴ Tratado Marco del Mercado Eléctrico Centroamericano, suscrito por los presidentes de Centroamérica en 1996 y refrendado por las asambleas de los seis países, en los cinco años siguientes.

I. ASPECTOS METODOLÓGICOS

Las externalidades representan costos y beneficios no incorporados a los precios de mercado que distorsionan las decisiones económicas. En la actualidad, la energía eléctrica en el mundo se genera principalmente a partir de combustibles fósiles. Esta generación produce impactos locales como la contaminación de áreas urbanas e industriales, regionales, como la lluvia o deposición ácida, y globales como el cambio climático. El costo de estos impactos de la producción de energía no ha sido incorporado al precio por la repercusión económica que conllevaría.

En 1991 la Unión Europea y el Departamento de Energía de los Estados Unidos (*Oak Ridge National Laboratory*) iniciaron un proyecto de investigación conjunta, cuyo principal objetivo fue realizar una evaluación comparativa de riesgo de diferentes sistemas de energía, incluidos el carbón y los ciclos de combustibles nucleares. Tal esfuerzo inicial fue conocido como “EC-US External Cost of Fuel Cycles Project”, cuyo propósito fue desarrollar una metodología común para determinar los costos externos de la generación de electricidad. Los trabajos se ampliaron a diversos países con el objetivo de aplicar las metodologías diseñadas.

La Unión Europea, en cumplimiento del principio de desarrollo económico sustentable con respecto al medio ambiente, establecido en el Tratado de Maastricht de 1992, impulsó el proyecto *Externalities of Energy* (ExternE)⁵ y reconoció la valoración de las externalidades de la producción y uso de la energía como una de las tareas de la comunidad científica europea. Este proyecto fue desarrollado por más de 30 equipos adscritos a diferentes centros de investigación de nueve países europeos.

El proyecto ExternE, cuyos primeros resultados se publicaron en 1995, utilizó la metodología “vías de impacto” en varios casos de estudio de plantas eléctricas individuales, con diferentes tipos de combustibles, en cada uno de los estados miembros de la Unión Europea, así como en plantas de incineración y en el transporte. Esta metodología es muy detallada y compleja, ya que requiere gran cantidad de datos de entrada, tanto técnicos como de salud, ambientales y económicos. Para llevarla a cabo se han construido modelos computacionales, como el Ecosense⁶, utilizado en el proyecto ExternE. Sin embargo, no todos los países pueden disponer de estos elementos, por lo que dicho proyecto desarrolló también una metodología simplificada, con menos necesidades de información de entrada y que recurre a una serie de aproximaciones. A pesar de su sencillez, esta versión arroja resultados razonablemente precisos. Inicialmente este modelo simplificado no era “amigable al usuario”, por lo que el OIEA apoyó su adaptación a un formato más accesible, y lo ofreció a los países miembros, con el nombre de SIMPACTS (OIEA, 2003). Este modelo fue el que se utilizó para el presente estudio.

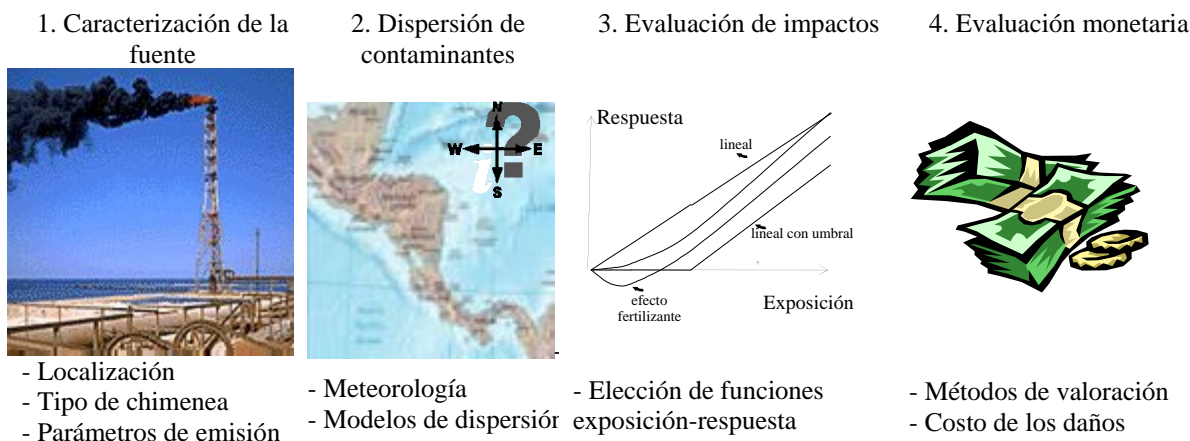
A. METODOLOGÍA VÍAS DE IMPACTO

La metodología “vías de impacto” comprende cuatro etapas (véanse Spadaro, 1999 y Turtós, 2003): 1) caracterización de la fuente emisora; 2) dispersión de los contaminantes y cálculo de concentraciones; 3) evaluación de los impactos, y 4) evaluación monetaria (véase el gráfico 1).

⁵ (<http://www.externe.info/>) y (<http://externe.jrc.es/overview.html>).

⁶ Programa desarrollado por el Instituto para Estudios Económicos y Uso Eficiente de la Energía, de la Universidad de Stuttgart.

GRÁFICO 1 ETAPAS DE LA METODOLOGÍA VÍAS DE IMPACTO



Fuente: CEPAL-SEMARNAT, 2004.

1. Primera etapa: caracterización de la fuente emisora

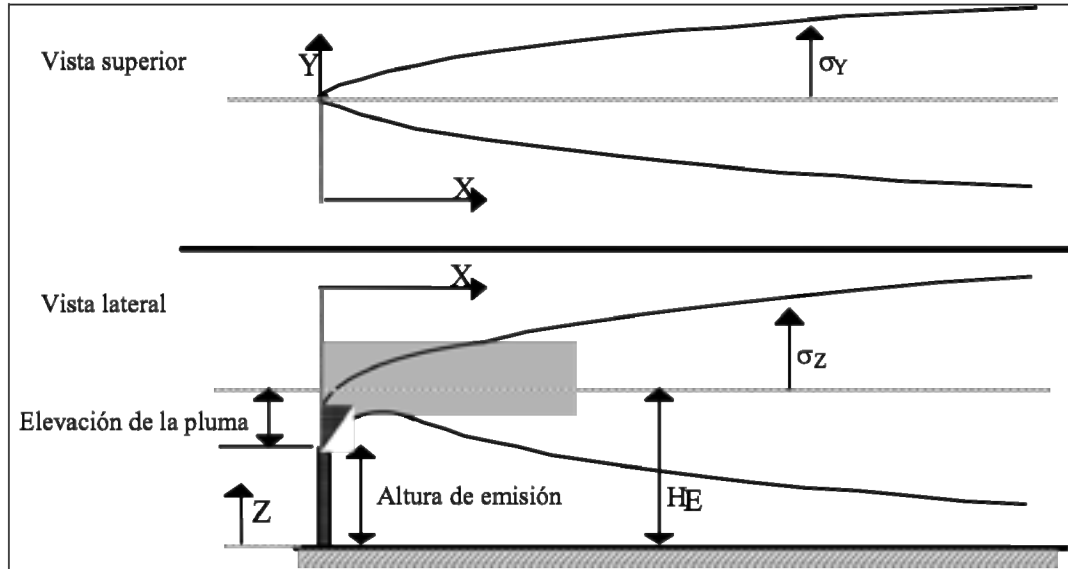
El primer paso consiste en obtener la información relativa a la fuente de emisión, con la inclusión de su localización (urbana o rural), sus coordenadas geográficas, características físicas y un inventario detallado de los contaminantes emitidos. Los parámetros de la fuente incluyen: el diámetro y la altura de la chimenea por la que se emiten los contaminantes, la temperatura, velocidad y flujo de los gases de escape, así como el volumen de emisiones, que depende de la tecnología y del tipo de combustible empleado.

2. Segunda etapa: dispersión de los contaminantes y cálculo de concentraciones

La dispersión atmosférica de los contaminantes puede ser estudiada en un área local, comprendida en un radio de hasta 50 km alrededor de la fuente, o en un área regional que puede alcanzar hasta algunos miles de kilómetros. Según la escala (regional o local), se emplean diferentes modelos de transporte de contaminantes para determinar las concentraciones.

Para la escala local, la dispersión de los contaminantes primarios depende fundamentalmente de parámetros meteorológicos, como la velocidad y la dirección del viento, la temperatura ambiente, la clase de estabilidad atmosférica y la altura de la capa de mezcla. En este análisis se utilizan modelos *gaussianos* para estimar los niveles de concentración de los contaminantes primarios emitidos por fuentes estacionarias con chimeneas (Spadaro, 1999). La consideración básica de estos modelos es que una vez que el contaminante es emitido, los perfiles de concentración vertical y horizontal pueden ser adecuadamente representados por dos distribuciones *gaussianas* independientes, cada una caracterizada por su propia desviación estándar o parámetro sigma (véase el gráfico 2).

GRÁFICO 2
PLUMA GAUSSIANA EN UN SISTEMA DE COORDENADAS
ORIENTADO EN LA DIRECCIÓN DEL VIENTO



Fuente: Spadaro (1999), *Quantifying the impacts of air pollution*.

En general, la concentración C de un contaminante es una función de las coordenadas (x, y, z) o (r, θ, z) según el sistema de coordenadas usado, el tiempo t , la tasa de emisión Q y otros parámetros de transporte atmosférico, como la velocidad y dirección del viento, y la estabilidad atmosférica. Generalmente se supone que el origen del sistema de coordenadas está fijo en la fuente de contaminación. La capa de mezclado identifica la zona más baja de la atmósfera donde ocurren los fenómenos de transporte, y se extiende hasta una altura de 100 m a 2.000 m, según el grado de turbulencia, la velocidad del viento y la rugosidad de la superficie terrestre.

En una fuente de emisión constante y condiciones meteorológicas estables, el incremento de la concentración según los modelos *gaussianos* se evalúa mediante la relación siguiente (Spadaro, 1999):

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \sum_{j=0, \pm 1, \dots} \left(e^{-\frac{(z+2jh_{mix}-h_e)^2}{2\sigma_z^2}} + e^{-\frac{(z+2jh_{mix}+h_e)^2}{2\sigma_z^2}} \right) \quad (1)$$

donde:

Q , tasa de emisión del contaminante,

u , velocidad del viento medida a la altura de la emisión,

σ_y y σ_z , parámetros de difusión lateral y vertical,

y , distancia en dirección normal a la dirección del vector del viento,

z , distancia vertical sobre tierra,

h_{mix} , altura de la capa de mezcla,

h_e , altura efectiva de la chimenea (altura de la emisión más el levantamiento de la pluma)

j , número de reflexiones de la pluma.

Los dos factores exponenciales después del símbolo de sumatoria consideran las reflexiones de la pluma a lo largo de la superficie de la tierra y en el borde superior de la capa de mezcla, respectivamente. Las concentraciones máximas generalmente ocurren a unos pocos kilómetros de la fuente.

La ecuación (1) es más exacta para predecir las concentraciones promedio a largo plazo o anuales, que para estimar las concentraciones instantáneas. La ecuación supone que no tienen lugar interacciones químicas en el aire y que las tasas de remoción seca y húmeda son irrelevantes. Se debe notar que las concentraciones estimadas dependen estrechamente de los parámetros de difusión σ_y y σ_z , frecuentemente determinados de manera semiempírica o estadística.

A escala regional, las interacciones químicas entre los contaminantes emitidos y las especies existentes en el aire⁷, que forman contaminantes secundarios, y los mecanismos de remoción vía deposición seca y húmeda⁸, tienen tanta importancia como los datos meteorológicos al determinar el destino de los contaminantes y sus niveles de concentración en el aire.

Los contaminantes secundarios se forman en la atmósfera después de la emisión, en alguna área lejana, donde el contaminante primario o precursor es transportado y mezclado con el aire ambiente debido a la turbulencia, por lo que su concentración no depende de las condiciones meteorológicas locales ni de los parámetros de la chimenea. Se calcula mediante modelos de transporte regional, que requieren la siguiente información para cada una de las celdas del dominio regional considerado, que puede extenderse hasta miles de kilómetros: a) datos meteorológicos promediados estadísticamente de velocidades y direcciones del viento y tasa de precipitación anual, y b) concentraciones de fondo de especies existentes en el aire, incluidos los propios contaminantes primarios, para simular las reacciones químicas de transformación (SO_x , NO_x , Compuestos Orgánicos Volátiles (COV), amoníaco (NH_3)) y el ozono (O_3).

3. Tercera etapa: evaluación de los impactos

a) Funciones exposición-respuesta

Una vez determinada la concentración de los contaminantes, se procede a calcular los impactos en la salud mediante las funciones exposición-respuesta. Estas funciones se determinan mediante estudios clínicos o epidemiológicos, que relacionan un efecto físico observado o síntoma en la salud (por ejemplo, número de ataques de asma, visitas a hospitales, ingresos hospitalarios por enfermedades respiratorias, reducción en la expectativa de vida, y otros), con una exposición dada a un contaminante, en términos de su concentración. En rigor debería considerarse como referencia la dosis que el receptor acoge y no la concentración de un contaminante. Esta dosis es función de la calidad del aire y de factores como el tiempo de exposición, la relación de concentración dentro y fuera de recintos cerrados, el nivel de

⁷ Es importante considerar que la generación de electricidad no es la única actividad que contribuye a la contaminación atmosférica y que los contaminantes emitidos por las centrales interactúan con las emisiones provenientes de otras fuentes tales como emisiones por el transporte, la agricultura, otra industria, entre otras. En este caso, las especies en el aire incluyen, por ejemplo, emisiones de fondo de amoníaco proveniente fundamentalmente de la agricultura y otras emisiones de SO_2 y NO_x , derivados de la industria y el transporte, y contaminantes secundarios como el ozono.

⁸ Fundamentalmente, los mecanismos de deposición húmeda se refieren a precipitación pluvial (ya sea en forma de lluvia, nieve o hielo), en la que los contaminantes son removidos de la atmósfera por la fuerza que ejerce la caída del agua. La deposición seca es la transferencia de contaminantes gaseosos o material particulado hacia la superficie de la Tierra, incluso suelo, agua y vegetación en los intervalos en que no hay precipitación pluvial. La forma más simple de deposición seca es la caída de las partículas por gravedad hasta la superficie; este proceso se llama sedimentación y normalmente afecta a las partículas de más peso. La deposición seca está fuertemente relacionada con los movimientos atmosféricos, como el viento, que puede transportar partículas, incluso miles de kilómetros desde su lugar de origen.

actividad física, la composición del aire contaminado, la dimensión y la distribución de especies y la proximidad a la fuente de contaminación. Sin embargo, en la práctica esta información tan detallada casi nunca está disponible, razón por la que se emplea la concentración en lugar de la dosis como variable independiente, y a la función se le denomina exposición-respuesta.

Los contaminantes atmosféricos pueden ejercer una amplia gama de efectos adversos para la salud humana, que pueden ser agudos y, más frecuentemente, crónicos. Entre ellos es posible mencionar: la disminución del flujo de aire en las vías respiratorias a nivel subclínico en los niños y en la población general (Brunekreef y Hock, 1993 y Schindler y otros, 1998); deterioro del rendimiento físico aun en personas sanas (OMS, 1997); irritación de las mucosas oculares y del tracto respiratorio superior; disminución de la resistencia a las infecciones del aparato respiratorio; menoscabo de la función pulmonar en los niños y en la población sana (OPS/OMS, 2000); aumento de la frecuencia, duración y severidad de las crisis agudas en pacientes asmáticos y de angina en pacientes de cardiopatía isquémica; incremento de la prevalencia y los síntomas de las enfermedades respiratorias obstructivas crónicas como la bronquitis crónica, e incluso el aumento de la incidencia de cáncer pulmonar, aun después de haber controlado el hábito de fumar y la exposición ocupacional (Molina y otros, 1996).

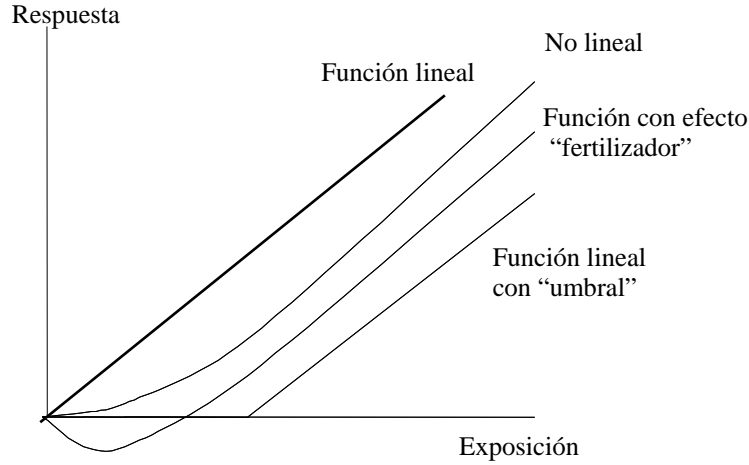
Por lo que respecta a los ecosistemas, la contaminación afecta a la vegetación, ya que lesiona cada hoja, reduce la fotosíntesis, y contribuye a la acidificación del suelo con las consecuentes pérdidas de la agricultura. Es especialmente dañina para los ecosistemas acuáticos, al contribuir a la acidificación de los cuerpos de agua, así como mermar los recursos pesqueros. Por otra parte, genera pérdidas económicas por su efecto en los materiales, ya que corroe los metales, deteriora cables eléctricos, el papel, los textiles, las pinturas, los materiales de construcción y los monumentos históricos. En ocasiones se obtienen beneficios en algunas cosechas agrícolas que, al exponerse a un incremento en las concentraciones marginales de SO_x y NO_x , necesitan menos fertilizante (Comisión Europea, 2005). Estos beneficios, sin embargo, dependen considerablemente de los niveles de la concentración de fondo⁹.

En las tres últimas décadas se realizaron estudios epidemiológicos para establecer y cuantificar los efectos de la contaminación atmosférica en seres humanos. Los resultados han verificado la existencia de una relación causa-efecto entre el incremento en el nivel de concentración de un contaminante específico y el número de casos reportados por centros de salud u hospitales. Asimismo, hay estudios muy importantes que muestran una correlación positiva entre la exposición de varios años a concentraciones de partículas en el aire y la mortalidad total, llamada *mortalidad crónica*, en contraste con la mortalidad aguda, que se refiere a las muertes ocasionadas por un episodio específico de contaminación (Dockery y otros, 1993; y Pope y otros, 1995). Como la sensibilidad individual a un estímulo externo puede variar considerablemente entre la población, las funciones exposición-respuesta se estipulan generalmente para los grupos de riesgo: niños menores de 14 años, adultos mayores de 65 y asmáticos, principalmente.

De acuerdo con los estudios epidemiológicos realizados, las funciones exposición-respuesta para la salud humana se consideran lineales, sin umbral, con la concentración como parámetro independiente. Esto supone que no existe ningún valor límite de concentración por debajo del cual el impacto en la salud a nivel de la población desaparece (véase el gráfico 3).

⁹ Las concentraciones de fondo se refieren al nivel o concentración normal de uno o varios agentes físicos o químicos en el medioambiente. Estas concentraciones se pueden asociar tanto a fuentes naturales como antropogénicas.

GRÁFICO 3
FUNCIONES EXPOSICIÓN-RESPUESTA



Fuente: Spadaro (1999), *Quantifying the Impacts of Air Pollution*.

b) Cálculo de los impactos

El impacto en la salud de la contaminación atmosférica se calcula con la fórmula presentada en la ecuación [2] para los casos discreto y continuo (Spadaro, 1999).

Caso discreto:

$$I = \sum_j N_{rec,j} F_{er}(r_j, C_j(Q))$$

Sobre toda la población

Caso continuo:

$$I = \int \rho(r) F_{er}(r, C(r, Q)) dA \quad (2)$$

Sobre el área de impacto

donde:

I , impacto estimado (casos anuales de enfermedad o años de vida perdidos),

$N_{rec,j}$, número de personas en el vector de localización r_j ,

r , distancia viento debajo de la fuente de contaminación,

F_{er} , función exposición-respuesta,

$C(r, Q)$, cambio en el incremento de la concentración de fondo en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para una tasa de emisión Q , en el vector de localización r ,

ρ , densidad de la población de riesgo en el vector de localización r (personas/ km^2),

A , área de impacto.

Los signos de sumatoria o de integración incluyen a toda la población expuesta a la contaminación que, además, experimenta sus efectos. El cálculo se hace considerando un sistema de coordenadas polares con coordenada al origen en la fuente de contaminación.

La función exposición-respuesta F_{er} se puede expresar como el producto del incremento de la concentración por la pendiente de la relación exposición-respuesta (f_{er}), es decir,

$$F_{er}(r, C(r, Q)) = f_{er} \otimes C(r, Q), \quad \text{donde } f_{er} = \partial F_{er} / \partial C.$$

Generalmente, la pendiente se calcula como el Incremento del Riesgo Relativo (IRR) al impacto en cuestión, multiplicado por la línea base, tal como indica la ecuación [3]. Tanto la pendiente de la F_{er} como el IRR y la línea base son números positivos.

$$f_{er} = \text{Incremento}_{\text{Riesgo Relativo}} \left(\frac{\%}{\mu\text{g} / \text{m}^3} \right) * \text{Línea}_{\text{base}} \left(\frac{\text{casos}}{\text{persona} - \text{año}} \right) \quad (3)$$

El IRR es el cambio en la tasa natural de incidencia de una enfermedad en particular (morbilidad) o en la mortalidad en una población en riesgo (adultos, niños, y otros), por unidad de cambio en la concentración ambiente ($\%/ \mu\text{g}/\text{m}^3$). La tasa natural de incidencia de una enfermedad en particular es la línea base, que se expresa en casos anuales normalizada por persona. Esta tasa se calcula como el producto de la tasa de incidencia o basal, que es el número de nuevos casos de una enfermedad en un período en una población dada, por la fracción del grupo de riesgo receptor con respecto a la población total. En consecuencia, la pendiente se expresa en casos anuales de enfermedad por grupo de riesgo por unidad de concentración ($\text{casos}/(\text{año-persona}-\mu\text{g}/\text{m}^3)$).

En el presente estudio, a fin de estimar el impacto en la mortalidad, se optó por utilizar el enfoque de pérdida de la esperanza de vida, y la mortalidad se expresa en años de vida perdidos (AVP) (Leksell y Rabl, 2001). En este caso, para obtener el valor de la pendiente de la función exposición-respuesta, se multiplica el IRR por la tasa de mortalidad y por los años de vida perdidos en cada caso.

El número de AVP para la muerte aguda varía desde unas pocas semanas hasta uno o dos años, aun cuando se considera en la metodología simplificada como valor promedio seis meses (0,5 años), de acuerdo con los últimos estudios del ExternE. En las muertes crónicas, el número de AVP depende de la tasa de mortalidad de la población. A su vez, esta tasa obedece a las condiciones demográficas, culturales, socioeconómicas y médicas de la población analizada, por lo que la generalización resulta a menudo difícil e incierta. En los estudios realizados en los Estados Unidos se ha considerado que en promedio una muerte crónica implica que se reduzca la esperanza de vida aproximadamente nueve años, mientras que en Europa, 11 años. En el presente análisis se toma como promedio: 10 años.

Cabe mencionar que otro enfoque para valorar la pérdida de la esperanza de vida es considerar el número de muertes estadísticas adicionales en lugar del número de años de vida perdidos. Dicho estudio no se utilizó en el presente porque la metodología de ExternE no lo recomienda.

4. Cuarta etapa: evaluación monetaria

El último paso en el análisis es la evaluación monetaria de los impactos obtenidos en la etapa anterior. Para el caso se utiliza la ecuación siguiente:

$$D = (I) (CU) \quad (4)$$

donde:

D , costo estimado de la externalidad (dólares por año),

I , impacto calculado por la ecuación (2)

CU , costo unitario (por ejemplo, costo por ataque de asma).

Para determinar los costos unitarios de los impactos de morbilidad es posible aplicar tres enfoques: costos directos asociados a la enfermedad, gastos preventivos y valoración contingente. Este último, utilizado en el proyecto ExternE, se basa en las preferencias individuales y se expresa mediante la “voluntad a pagar” (en inglés, *Willingness to Pay*) por algo que mejora el bienestar individual, o “voluntad de aceptar” (*Willingness to Accept*), por algo que la reduce. Incluye el costo directo de la enfermedad, cualquier ingreso perdido (pérdida de productividad) y cualquier costo social de la enfermedad. Es decir, comprende el costo de cualquier gasto para prevenir, mitigar o tratar los efectos de la enfermedad, el valor del tiempo perdido por ésta y el valor del bienestar o utilidad perdidos por dolor y sufrimiento.

El costo directo de una enfermedad abarca el costo de atención médica (gastos por medicamentos, consultas con especialistas, hospitalización y análisis de laboratorios, entre otros). Para determinarlos se requiere información del diagnóstico y tratamiento típico de cada enfermedad, así como el tipo de servicios disponibles en las localidades consideradas (tipo de hospital, recursos humanos y materiales disponibles). El costo del tiempo perdido o pérdida de productividad se basa en el costo del tiempo que una persona pierde por enfermedad y la consecuente disminución en la producción. En ambos conceptos se utilizan como referencia los precios de mercado (costo de medicamentos, salario del trabajador, entre otros). Conviene mencionar que el costo directo de una enfermedad es sólo una parte del costo total.

Para estimar los costos del impacto en la mortalidad se pueden utilizar tres enfoques: valoración contingente, diferencias salariales y capital humano. El primero, utilizado en ExternE, representa la medida más completa de los beneficios individuales por reducir la mortalidad. Con ese propósito, se calcula inicialmente el Valor Estadístico de la Vida (VEV) (o *Value of Statistical Life*, VSL), a partir de la estimación de la “voluntad a pagar” por un cambio en el riesgo de muerte. Luego se encuentra el Valor de un Año de Vida Perdido (VAVP o *Value of a Year of Life Lost*) para la muerte aguda (aquella producida por un episodio de contaminación), mediante el uso de la ecuación (5) (Spadaro, 1999), para una tasa de descuento dada sobre el intervalo de tiempo considerado.

$$VAVP_{Agudo} = VEV \left(1 / \sum_{i=a}^{T_i} \frac{{}_a P_i}{(1 + d_r)^{i-a}} \right) \quad (5)$$

donde:

a , edad del individuo cuyo VAVP es calculado,

${}_a P_i$, probabilidad de que un individuo de edad a sobreviva hasta la edad i (valor esperado de la expectativa de vida para una edad específica),

T_i , expectativa máxima de vida (ejemplo: 100 años),

d_r , tasa de descuento

En las fases iniciales del proyecto ExternE se consideró un valor promedio estadístico de vida igual a 3,1 millones de ECU₁₉₉₅¹⁰, o 3,9 millones dólares para una tasa de descuento base de 3% ($d_r = 0,03$). Sin embargo, en estudios posteriores se han calculado VEV menores, de 1.500.000 dólares de 2000 (Markandya y otros, 2002), con el que se obtendría un VAVP de 174.000 dólares de 2000 para la misma tasa de descuento. Este valor se utiliza para determinar el costo de muertes agudas.

El análisis de la mortalidad crónica es muy diferente al de la mortalidad aguda, pues la muerte no se produce inmediatamente después de un episodio de exposición, sino muchos años después. Así, la

¹⁰ ECU (European Currency Unit) era una canasta de divisas de países miembros de la Comunidad Europea, creada por el Sistema Monetario Europeo, que servía como unidad de cambio o contabilidad como fase previa a la entrada del Euro, que reemplazó los ECU el 1 de enero de 1999 a una paridad de 1 ECU = 1 EURO.

ecuación debe ser modificada para tener en cuenta los efectos de una exposición prolongada antes de la muerte. En los estudios de ExternE se calculó mediante un estimado del valor de un año de vida perdido “ponderado”. La premisa fundamental es que el riesgo total de muerte está uniformemente distribuido en un período de 30 años (en otras palabras, cada año contribuyó 1/30 al impacto total). El VAVP para casos de mortalidad crónica se calcula mediante la ecuación (6) (Spadaro, 1999).

$$VAVP_{Crónico} = \sum_{i=1}^{70} \frac{AVP_i}{AVP_{tot}} \frac{VAVP_{Agudo}}{(1 + d_r)^{i-1}} \quad (6)$$

donde:

AVP_i , número de años de vida perdidos en el año i como resultado del incremento del riesgo o daño,

AVP_{tot} , número total de años de vida perdidos en la población entera durante un período de 70 años.

Si se considera el VEV en 1.500.000 dólares de 2000, se encuentra un VAVP para muerte crónica de 101.000 dólares del mismo año para una tasa de descuento de 3%. Como se mencionó anteriormente, se estiman en promedio unos 10 AVP por cada muerte crónica relacionada con la contaminación atmosférica. Dentro del grupo de riesgo, sólo se consideran las personas mayores de 30 años debido a que se supone que en las personas menores de 30 años el cuerpo es capaz de neutralizar con sus propios mecanismos los efectos negativos de la contaminación atmosférica (Spadaro, 1999).

Cabe destacar que los costos de mortalidad crónica, calculados mediante el VEV, son mayores que los calculados mediante el AVP¹¹.

B. METODOLOGÍA SIMPLIFICADA Y MODELO SIMPACTS DEL OIEA

El modelo SIMPACTS consta de tres módulos principales: AIRPACTS, NUKPACTS e HYDROPACTS. En el primero se estima el impacto en la salud humana, las cosechas agrícolas y los materiales a causa de su exposición a la contaminación. En los otros dos módulos se analiza el impacto de las centrales nucleares e hidroeléctricas, respectivamente. Gracias a su carácter significativo, en el presente estudio sólo se utilizó el primero, restringido al impacto en la salud humana.

Para evaluar el impacto en la salud, AIRPACTS incluye varios modelos con diversos procedimientos de cálculo que representan diferentes niveles de acercamiento analítico al problema en cuestión, según la información disponible:

1) Modelo Simplificado Básico (SUWM, por sus siglas en inglés). Es el más simple, ya que sólo considera como parámetros la densidad de población regional en un radio de 500 km, a 1.000 km de la fuente y la tasa de emisión de contaminantes para resolver de una manera aproximada la ecuación de impacto (ecuación 2).

2) Modelo Simplificado Mejorado (RUWM, por sus siglas en inglés) que consta de tres versiones (Estimaciones Básica, Media y Superior). Considera los parámetros reales de la fuente en su estimación más exacta o superior (en particular, la altura de la chimenea y el flujo de gases), pero aplica un tratamiento simplificado para resolver la ecuación de función del daño, al suponer una distribución uniforme de la población a nivel local y otra a nivel regional.

¹¹ En estudios de valoración de la vida se ha encontrado que la pérdida típica de la vida varía entre 30 y 40 años. Estas cifras son tres a cuatro veces mayores que el resultado obtenido por la cuantificación de años de vida perdidos que, como ya se indicó, se estiman en 10 AVP por cada muerte relacionada con la contaminación.

3) Modelo para la estimación de los impactos en la salud (QUERI, por sus siglas en inglés), que consta de tres versiones (Estimaciones Básicas, Media y Superior). Evalúa el impacto en la salud debido a los contaminantes primarios y secundarios presentes en la atmósfera por medio de un enfoque semiempírico que utiliza factores de corrección, determinados con base en los resultados de análisis con modelos detallados de la Metodología Vías de Impacto, en algunas localizaciones en Europa con diferentes características de la fuente emisora. La estimación más exacta o superior requiere de información meteorológica detallada, en tanto que la media considera sólo valores promedio de velocidad y dirección del viento.

4) Modelo para ambientes urbanos (URBAN, por sus siglas en inglés); consta de dos versiones (Estimaciones Básica y Superior). Estima el impacto en la salud y los costos respectivos resultantes de los contaminantes primarios y secundarios emitidos por una fuente ubicada en un ambiente urbano o cercano a éste. Considera una rosa de vientos uniforme y velocidades medias de viento, y estima una distribución de población aproximada por una función tipo *gaussiana*, aunque también puede aceptar los valores reales de población en celdas de 5 x 5 km.

A pesar de las simplificaciones del SUWM y el RUWM, los estimados del impacto son razonablemente próximos a los valores obtenidos en Europa cuando se aplicó la versión detallada de la Metodología Vías de Impacto (Spadaro, 1999). Los resultados se aproximan aún más cuando la fuente se localiza en un área rural o poco poblada. En particular, los estimados del SUWM para una fuente de altura de chimenea de 25 m o más varían dentro de un orden de magnitud con respecto a los valores obtenidos en la versión detallada de la Metodología Vías de Impacto, aun cuando las fuentes estén localizadas cerca de ciudades densamente pobladas.

La estimación superior del QUERI es el procedimiento de cálculo del modelo AIRPACTS que proporciona resultados más exactos, ya que considera una gran cantidad de información detallada como: distribución de la población local en una resolución de 5 x 5 km, datos meteorológicos detallados para un año de referencia y todos los parámetros de la fuente emisora. El QUERI calcula los efectos locales causados por los contaminantes primarios, así como los efectos regionales por contaminantes primarios y secundarios (Turtós, 2003). En estudios comparativos de los resultados del modelo detallado y del QUERI en varias localidades europeas se reportan desviaciones comprendidas entre $\pm 30\%$ (Spadaro, 1999).

La dispersión local de los contaminantes primarios en el QUERI se calcula mediante un modelo de dispersión *gaussiano*, el Industrial Source Complex Long Term Model (ISCLT2) de la Environmental Protection Agency (EPA) de los Estados Unidos. Para estimar el impacto regional, se aplica la fórmula simplificada del modelo básico SUWM, ya que no cuenta con un modelo de dispersión regional. Esta fórmula requiere conocer la velocidad de remoción de los diferentes contaminantes, la que se puede estimar mediante modelos de simulación o a partir del tiempo de residencia de los contaminantes en la atmósfera. En caso de no tener esta información para la zona de estudio, se pueden utilizar los valores que recomienda el módulo AIRPACTS.

En el cuadro 1 se resume la información requerida para cada uno de los procedimientos de cálculo descritos anteriormente, relativa a la fuente de emisión, datos meteorológicos y datos de los receptores. Según la disponibilidad de los datos en cada caso, el módulo AIRPACTS selecciona de manera automática el procedimiento de cálculo más completo aplicable.

Para cada central de producción de electricidad estudiada se deben usar los datos meteorológicos de la estación más cercana, con condiciones geográficas y físicas similares, recomendadas por el Servicio Meteorológico Nacional. Aunque el AIRPACTS incluye variables por defecto, conviene utilizar

metodologías nacionales para calcular las variables meteorológicas secundarias, como la estabilidad atmosférica y las alturas de la mezcla urbana y rural.

CUADRO 1
INFORMACIÓN REQUERIDA POR LAS DIFERENTES VERSIONES DEL MÓDULO AIRPACTS

Parámetros	SUWM	RUWM		QUERI		URBAN	
		Media	Superior	Básica	Media		Superior
Dominio local: datos de la fuente							
Ubicación, latitud y longitud		✓	✓	✓	✓	✓	✓
Zona horaria							✓
Altura de la chimenea			✓		✓		✓
Diámetro de la chimenea			✓			✓	✓
Temperatura de gases de escape			✓	‡	‡	✓	✓
Velocidad de gases de escape			✓	‡	‡	✓	✓
Tasa de emisión	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Dominio local: datos meteorológicos							
Velocidad media del viento			✓		✓		✓
Temperatura ambiente media			✓		✓		✓
Estadísticas de estabilidad atmosférica			✓		✓		✓
Datos meteorológicos			*			✓	*
Altura del anemómetro						✓	
Dominio local: datos de los receptores							
Localización urbana o rural		✓	✓	✓	✓	✓	Zonas urbanas
Densidad local de receptores		✓	✓	‡	✓		
Distribución de los receptores		†	†	†	†	✓	✓
Dominio regional							
Densidad regional de los receptores	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Fuente: Turtós (2003), *Revisión de metodologías utilizadas para la estimación de las externalidades, Proyecto Uso Sustentables de Hidrocarburos*.

✓ Dato imprescindible.

‡ Si se conoce, los resultados son más exactos.

* Puede ser sustituido por los valores medios estadísticos.

† Puede ser sustituido por la densidad local de los receptores.

Asimismo, se requieren los datos de población, ya sea densidades regionales o locales, o la distribución en una resolución de 5 x 5 km. Para ello se debe usar un Sistema de Información Geográfica (SIG) con capas de población actualizadas al menos hasta el nivel municipal.

Con respecto a las funciones exposición-respuesta, lo óptimo es contar con funciones propias del lugar donde se lleva a cabo el estudio. Debido a su alto costo, a nivel internacional se ha realizado un número muy reducido de estudios epidemiológicos destinados a definir estas funciones. Por ello, es recomendable emplear toda la información local y compararla con los estudios internacionales, a fin de hacer compatibles los resultados y definir las funciones que se utilizarán para calcular los impactos en el sitio seleccionado.

Es conveniente conocer también la distribución de la población por grupos de riesgo (niños, adultos, ancianos, asmáticos, adultos mayores de 30 años), ya que algunas F_{er} están referidas a estos

grupos y no a la población en general. Asimismo, conviene disponer de los índices básicos de mortalidad y de incidencia de las enfermedades más relacionados con la contaminación atmosférica cuando se usen F_{er} donde se conozca el incremento del riesgo.

Para determinar los costos del impacto en ausencia de estimaciones nacionales, se pueden utilizar los costos reportados por el Proyecto ExterneE para la Unión Europea (costos-UE) o los de otros estudios internacionales, y transferirlos a las condiciones nacionales o locales de un país (costos-país), de acuerdo con la relación siguiente:

$$\text{Costo-país} = (\text{Costos-UE}) (R_{ajt} [\text{dólares/caso}]) \quad (7)$$

donde: costo-país es el costo unitario en el país donde se aplica el estudio

R_{ajt} es un factor de ajuste

Existen varias formas de determinar el valor del factor de ajuste R_{ajt} , entre ellas las siguientes:

$$a) \quad R_{ajt} = (PPA_INBp_País / PPA_INBp_UE)^E,$$

donde:

$PPA_INBp_país$ es la paridad del poder adquisitivo del ingreso nacional bruto del año de referencia del país a evaluar y se divide entre la paridad correspondiente al país donde se realizó el estudio (Unión Europea o los Estados Unidos) y E es un coeficiente de elasticidad-ingreso, al que generalmente se le asigna un valor comprendido entre 0,35 y 1. En este estudio se consideró $E = 1$.

$$b) \quad R_{ajt} = (PIBp_país / PIBp_UE)^E,$$

donde:

$PIBp$ es el producto interno bruto per cápita (dólares/persona).

$$c) \quad R_{ajt} = 1,$$

en casos en que los costos de la salud sean iguales a los de la Unión Europea.

La elasticidad-ingreso de la demanda mide el cambio en la cantidad demandada de un bien cuando cambia el ingreso de los consumidores. Se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\eta_I = \frac{\Delta\% Q_D}{\Delta\% I}$$

donde:

η_I , es la elasticidad-ingreso de la demanda

$\Delta\% Q_D$, es el cambio porcentual en la cantidad demandada

$\Delta\% I$, es el cambio porcentual en el ingreso

En función de la elasticidad-ingreso, los bienes pueden clasificarse en bienes inferiores (elasticidad-ingreso negativa) y bienes normales (elasticidad-ingreso positiva). Dentro de los bienes normales se encuentran los bienes de primera necesidad, definidos como aquéllos con elasticidades entre 0 y 1 ($0 > \eta_I > -1$). Un valor unitario para la elasticidad ingreso indica que los gastos en salud se consideran de primera necesidad.

Utilizar un valor igual a la unidad en la transferencia de costos implica que se considera un cambio en el valor de voluntad a pagar proporcional al diferencial existente entre los ingresos per cápita de los países que se compara, mientras que usar un valor igual a cero implicaría que no hay ningún ajuste (Comisión Europea,

2005). Es recomendable analizar la sensibilidad de este parámetro en la transferencia de costos. Para este estudio se utiliza una elasticidad unitaria, que es la misma empleada en el estudio realizado para México.

C. INCERTIDUMBRES

La incertidumbre en la evaluación de los costos externos se debe al insuficiente conocimiento disponible de las variables o procesos involucrados. Las fuentes de incertidumbre para la Metodología Vías de Impacto son variadas. Entre ellas se pueden mencionar las siguientes (Rabl, 2002):

1) Incertidumbre en los datos, por ejemplo, la ausencia de información meteorológica detallada, la complejidad del terreno, la velocidad de remoción de los contaminantes, la pendiente de las funciones exposición-respuesta, el costo de un día de actividad restringida, entre otros. Por el contrario, los análisis técnicos y los datos disponibles sobre las emisiones de los principales contaminantes (CO_2 , PM_{10} , SO_2 y NO_x) sugieren que la incertidumbre es baja. La fiabilidad de los datos recopilados por los operadores y los equipos de las estaciones meteorológicas, en cambio, no siempre es alta.

2) Incertidumbre en los modelos de simulación de la dispersión atmosférica y la transformación química, las suposiciones acerca de las relaciones causales entre un contaminante y su impacto en la salud, las suposiciones sobre la forma de la función exposición-respuesta (con umbral o sin umbral), la transferencia de dicha función de un sitio geográfico a otro, la falta de consideración de algunos efectos por falta de conocimiento actualizado, y otras.

3) Incertidumbre debido al proceso de selección de variables políticas o éticas, por ejemplo la tasa de descuento intergeneracional, la variación por edad o ubicación geográfica del valor de la vida, el valor estadístico de la vida, la aversión al riesgo, entre otros.

4) Incertidumbre acerca del futuro, por ejemplo los avances en el tratamiento de enfermedades, el desarrollo de variedades agrícolas genéticamente más resistentes, cambios en los estilos de vida y otros.

5) Idiosincrasia del analista, por ejemplo interpretaciones diferentes de información ambigua o incompleta, errores humanos, fallas al no reconocer la importancia de la incertidumbre en ciertas áreas, entre otros.

La función general de los costos externos en la Metodología Vías de Impacto es un proceso multiplicativo que comprende cuatro variables independientes aleatorias: el incremento de la concentración, la función exposición-respuesta, la densidad de la población y el costo económico. Para este tipo de función general, de acuerdo con el teorema del límite central de estadísticas, la distribución natural es log normal, definida por la media geométrica μ_g y la desviación geométrica estándar σ_g . El intervalo de confiabilidad de 68% se expresa como: $[\mu_g/\sigma_g, \mu_g*\sigma_g]$.

Según Ari Rabl, la incertidumbre en la evaluación de los costos externos es muy grande, con valores típicos de desviación geométrica estándar entre 3 y 5. Esto significa que el valor real podría ser de 3 a 5 veces menor o mayor que el estimado de la media geométrica. De forma que el intervalo entre el valor superior y el inferior de los costos sólo varía por un orden de magnitud. En el caso de los contaminantes primarios (PM_{10} , SO_2 y NO_x), dicha desviación se ubica alrededor de 3, siendo mayor en los contaminantes secundarios, particularmente el ozono. Sin embargo, tal como lo expresa Rabl: "...un estimado con una incertidumbre muy alta es mejor que no tener ninguno".

II. INFORMACIÓN PARA LOS MODELOS UTILIZADOS

La aplicación de la Metodología Vías de Impacto mediante el modelo SIMPACTS para evaluar externalidades en la producción de electricidad en Centroamérica requirió de una serie de datos técnicos, económicos y de salud. Toda la información utilizada corresponde a 2008, salvo cuando se aclare expresamente. Ese año se considera como referencia base por el Consejo de Electrificación de América Central (CEAC) en su Plan Indicativo de Expansión de la Generación, período 2009-2023. Con los datos disponibles se pudo correr la versión del RUWM#1 del AIRPACTS.

A. CENTRALES DE GENERACIÓN

Con base en la información estadística de la producción de electricidad contenida en el documento Istmo Centroamericano: Estadísticas del Subsector Eléctrico (CEPAL, 2009^a) se seleccionaron las centrales de generación cuyos costos externos serían evaluados. Se procedió entonces a recopilar la información requerida por los modelos.

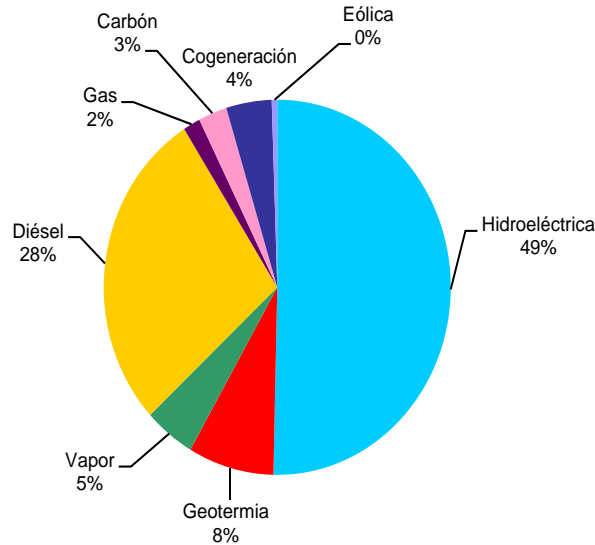
1. Selección de las centrales termoelectricas

De acuerdo con el citado compendio de estadísticas del subsector eléctrico de 2009 de la CEPAL, la generación neta de electricidad total del Centroamérica fue de 39.398,7 GWh, producidos a partir de las siguientes fuentes: hidráulica (50,3%), derivados del petróleo (34,5%), geotermia (7,9%), bagazo de caña en ingenios azucareros (4,1%), carbón (2,7%) y viento (0,5%) (véase el gráfico 4). La ubicación de las principales plantas de generación se muestra de manera esquemática en el mapa 1.

Las plantas seleccionadas para los propósitos del estudio son aquellas que en su conjunto contribuyeron con 90% de la electricidad generada en plantas térmicas. Con base en la información presentada para cada país en el compendio estadístico sobre las empresas eléctricas generadoras en operación en 2008, se ordenaron todas las plantas públicas y privadas que se encontraran en la categoría de térmicas según su generación. Las plantas que resultaron seleccionadas por el estudio son: ICE (CR1), Energy Int. (CR2), Duke (ES1), Nejapa (ES2), Inversiones Energéticas (ES3), Textufil (ES4), San José (G1), Duke E.I.G. (G2), Ingenios, Poliwatt (G3), Genor (G4), Lufussa (H1), Enersa (H2), EMCE (H3), ELCOSA (H4), GEOSA (N1), EEC (N2), Tipitapa (N3), GECSA (N4), NSEL (N5), CENSA (N6), Monte Rosa (N8), PAN-AM (P1), Egeminsa (P2) y Pedregal (P3). Entre paréntesis se muestra el identificador de cada una de las centrales que se utilizará en lo sucesivo para cada central; la primera letra corresponde a la inicial o iniciales del país donde se ubica la central (véase el cuadro 2).

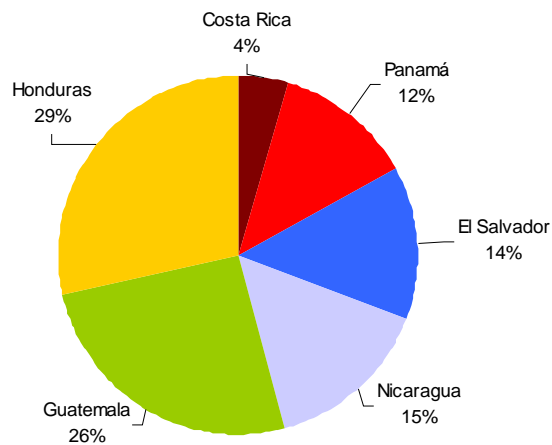
Es conveniente remarcar que el criterio de selección fue la generación de las centrales y su aporte al total de Centroamérica. Debido al perfil de generación de cada país, algunos países contribuyen más con la generación con base en combustibles fósiles, hecho que se refleja en la cantidad de plantas que se evaluaron para cada país. En el capítulo de resultados se presenta un análisis comparativo con indicadores para los distintos países y para Centroamérica en su conjunto.

GRÁFICO 4
GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN CENTROAMÉRICA, 2008
 (En porcentajes)



Fuente: Elaboración propia con datos oficiales (CEPAL 2009^a), *Istmo Centroamericano: Estadísticas del Subsector Eléctrico, Informe preliminar del segmento de la producción de electricidad.*

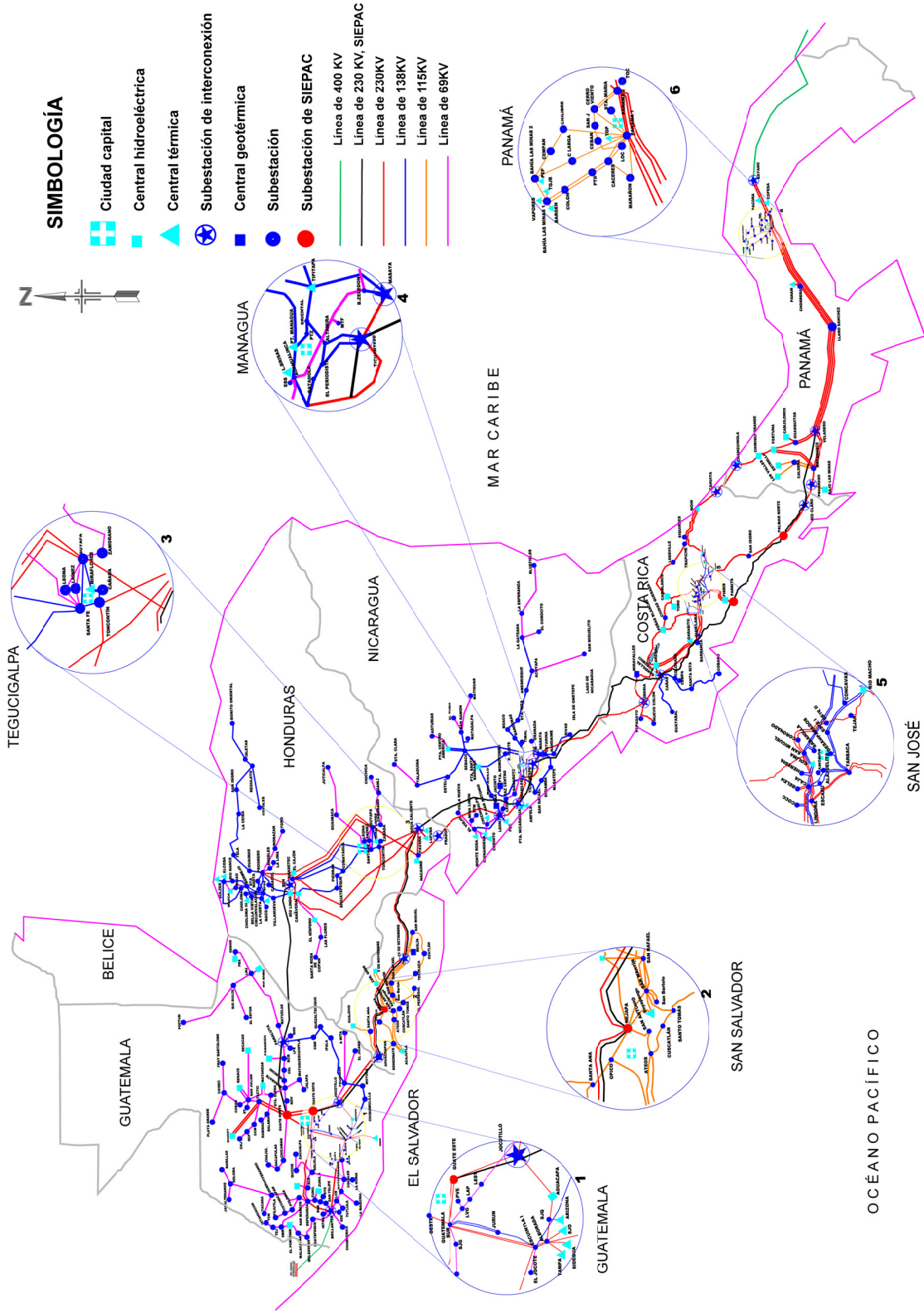
GRÁFICO 5
CONTRIBUCIÓN POR PAÍS A LA GENERACIÓN TÉRMICA EN CENTROAMÉRICA EN 2008
 (En porcentajes)



Fuente: Elaboración propia con datos oficiales (CEPAL 2009).

Las plantas seleccionadas aportaron 14.151 GWh, 90% del total generado en plantas térmicas, y 36% del total generado por todas las tecnologías en Centroamérica.

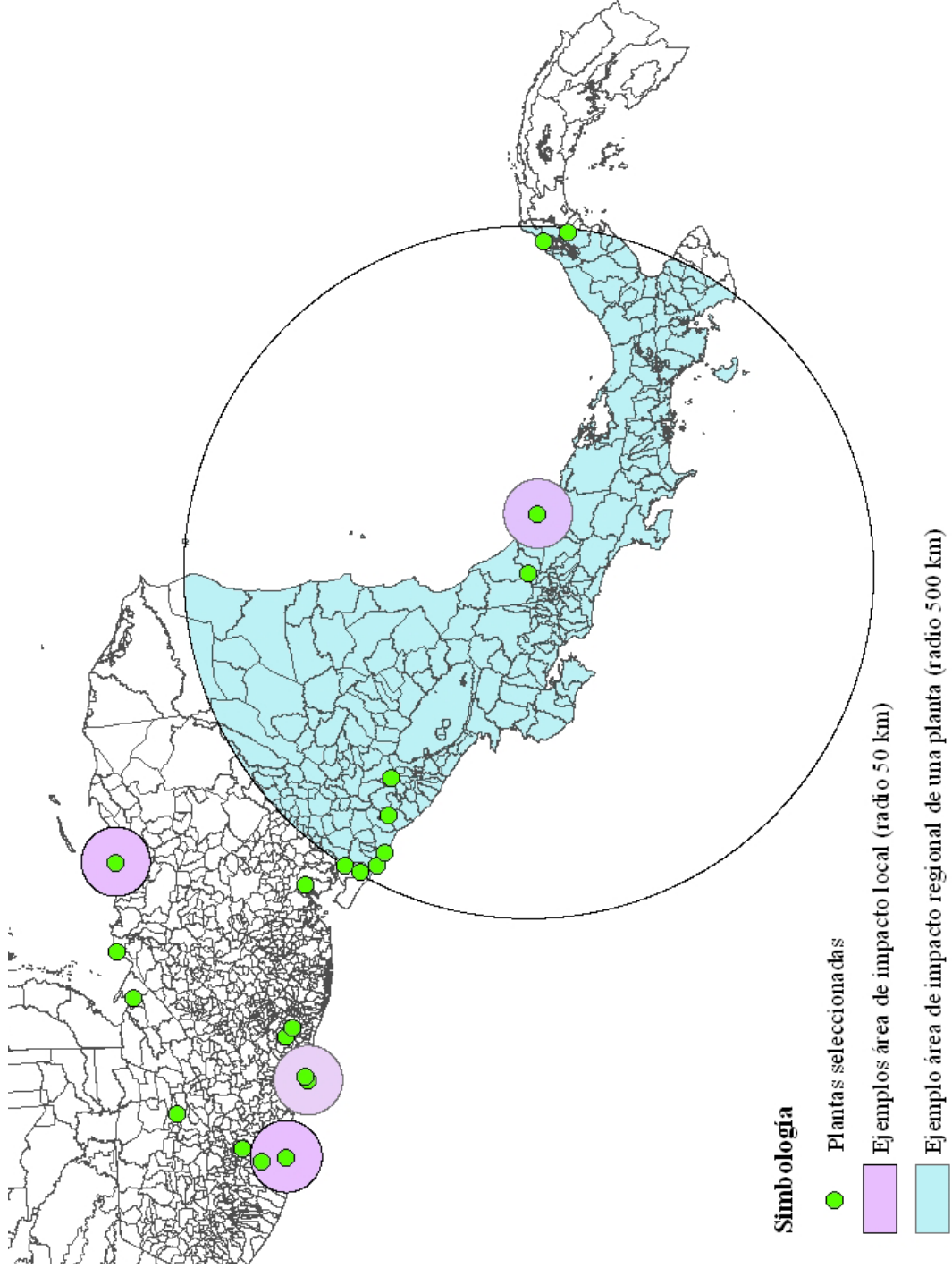
MAPA 1
CENTRALES ELÉCTRICAS EN CENTROAMÉRICA, 2008³



Fuente: Centro Nacional de Planificación Eléctrica, Instituto Costarricense de Electricidad.

³ Los límites y los nombres que figuran en este mapa pueden no coincidir con los de las Naciones Unidas.

MAPA 2
PLANTAS SELECCIONADAS PARA EL ESTUDIO^a



Fuente: Elaboración propia.
^a Los límites y los nombres que figuran en este mapa pueden no coincidir con los de las Naciones Unidas.

CUADRO 2
CENTROAMÉRICA: CENTRALES TÉRMICAS SELECCIONADAS

Nombre de la central	Número de centrales	Potencia instalada (kW)	Generación en 2008 (MWh)	Identificador de la central en este estudio
ICE	7	422 609	473 503	CR1
Energy Int.	1	140 920	143 395	CR2
Duke	2	338 300	809 500	ES1
Nejapa	1	144 000	521 100	ES2
Inv. Energéticas	1	51 200	312 900	ES3
Textufile	1	44 100	161 700	ES4
San José	1	139 000	1 016 630	G1
Duke E.I.G.	2	231 335	962 250	G2
Ingenios	1	350 844	870 020	G3
Poliwatt	2	151 400	601 060	G4
Genor	1	46 200	192 340	G5
Lufussa	3	386 900	2 068 574	H1
Enersa	1	259 000	1 507 160	H2
EMCE	2	141 600	243 935	H3
ELCOSA	1	80 000	198 838	H4
GEOSA	2	120 000	559 600	N1
EEC	1	74 000	518 840	N2
Tipitapa	1	52 200	392 960	N3
GECSA	4	243 600	382 610	N4
NSEL	1	59 300	189 860	N5
CENSA	1	63 900	153 500	N6
Monte Rosa	1	67 500	147 970	N7
PAN-AM	1	99 000	663 619	P1
Egeminosa	1	280 000	654 376	P2
Pedregal	1	55 350	404 564	P3
Total	41	4 042 258	14 150 804	P3

Fuente: Elaborada con base en información de CEPAL, 2009^a. Se precisa que en el identificador se consideran las primeras letras del país en que está ubicada la central CR = Costa Rica; ES = El Salvador; G = Guatemala; H = Honduras; N = Nicaragua, y P = Panamá.

2. Datos técnicos de las centrales seleccionadas

Para cada una de las 25 centrales estudiadas se recopiló información geográfica, como su ubicación (coordenadas geográficas) y la densidad de población local y de población regional (véase el cuadro 3). Para ello se utilizó la base de datos georreferenciada del Sistema de Información Ambiental Mesoamericano de la Comisión Centroamericana de Ambiente y Desarrollo¹². Para el caso de la información sobre población de Honduras y El Salvador, al no estar disponible en dicha base de datos, se utilizaron los censos de 2001 y de 2005, respectivamente, últimos disponibles para cada país¹³. Con información de la CEPAL sobre la distribución espacial de la población y urbanización en América

¹² Base de Datos SIG de Mesoamérica/CCAD-BM 2002 (<http://www.ccad.ws/mapas/mapoteca.htm>).

¹³ Censo de población de El Salvador (<http://www.digestyc.gob.sv/>); Censo de población de Honduras (<http://www.ine-hn.org/>).

Latina y El Caribe¹⁴ y el uso de un sistema de información geográfica se agregó la información sobre densidad de población para dichos países. Se utilizó asimismo el Mapa 1, información sobre el municipio en que se encuentran las plantas y el programa Google Earth¹⁵.

CUADRO 3
CENTROAMÉRICA: UBICACIÓN DE LAS CENTRALES TERMOELÉCTRICAS
Y DENSIDAD DE POBLACIÓN

(Latitud y longitud en grados; densidad en habitantes/km²)

Central ^a	Latitud	Longitud	Densidad de población local en 50 km	Densidad de población regional en 500 km
CR1	9°59'22.53"N	83° 5'33.01"O	39	45
CR2	10°12'20.92"N	83°47'21.26"O	187	41
ES1	13°35'0.15"N	89°49'26.22"O	152	56
ES2	13°49'6.32"N	89°14'37.89"O	411	61
ES3	13°36'30.46"N	89°45'42.98"O	248	66
ES4	13°43'20.42"N	89° 8'22.39"O	415	60
G1	14°14'4.18"N	90°49'0.56"O	78	61
G2	14°27'52.60"N	90°38'4.23"O	108	59
G3	15°15'15.21"N	90° 7'38.19"O	32	55
G4	13°55'24.72"N	90°46'52.73"O	36	62
G5	15°42'21.83"N	88°35'0.40"O	59	49
H1	13°24'30.10"N	87°19'52.52"O	26	52
H2	15°33'49.25"N	87°57'48.68"O	165	49
H3	15°45'59.62"N	86°47'19.48"O	65	47
H4	15°51'21.84"N	87°57'19.57"O	192	48
N1	12°16'37.23"N	86°34'0.15"O	204	62
N2	12°29'16.06"N	87°10'14.00"O	99	62
N3	12°11'47.83"N	86° 5'48.55"O	244	63
N4	12°52'55.22"N	87° 8'32.24"O	88	58
N5	12°52'55.22"N	87° 8'32.24"O	88	58
N6	12°22'13.15"N	87° 1'44.27"O	91	63
N7	12°42'10.29"N	87°13'57.38"O	93	60
P1	9° 3'32.89"N	79°45'42.73"O	212	33
P2	9°22'19.87"N	79°49'24.63"O	154	36
P3	9°22'19.87"N	79°49'24.63"O	154	36

Fuente: Elaboración propia con base en información oficial.

^a Para la identificación de las siglas, véase el cuadro 2 en la página 28.

A fin de estimar las emisiones de 2008, se utilizó información sobre el consumo de combustibles fósiles y carbón para generar electricidad proporcionada por la CEPAL, desglosada por tipo de combustible, volumen y país. Se estima que en 2008 el subsector eléctrico en Centroamérica consumiría 17.818.000 barriles de derivados de petróleo, 1.945 correspondientes a diésel y 15.873 a *fuel oil*. Para estimar las emisiones se utilizaron los factores de emisión del IPCC¹⁶. En el caso de Guatemala, al no

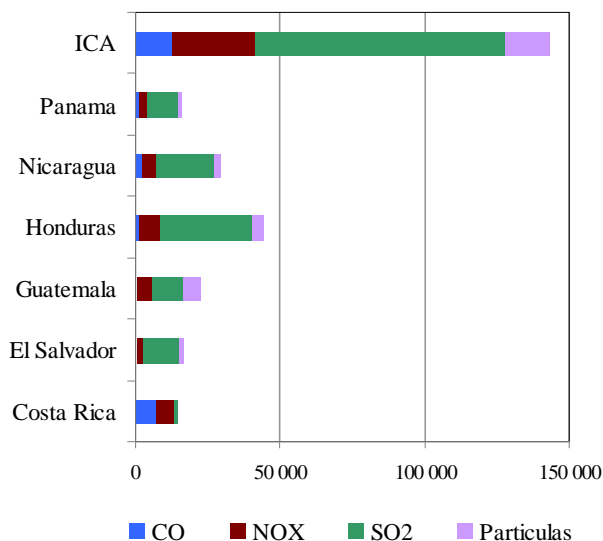
¹⁴ Distribución Espacial de la Población y Urbanización en América Latina y El Caribe (<http://www.eclac.cl/celade/depualc/>).

¹⁵ (<http://earth.google.com/>).

¹⁶ Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Reference Manual, excepto para Partículas PM₁₀ de Environmental Protection Agency (1997). Compilation of Air Pollutant Emission Factors. AP-42.

contar con los consumos de combustibles se asumió un incremento proporcional de las emisiones, de acuerdo con el aumento de la generación en 2008 por tipo de combustible. Con esta información, se tiene una emisión total en el Istmo Centroamericano (ICA) de 8.283.569 toneladas de CO₂, 12.484 toneladas de CO, 28.805 toneladas de NO_x, 86.632 toneladas de SO₂ y 15.478 de partículas. La contribución por país se muestra en el gráfico 6.

GRÁFICO 6
CENTROAMÉRICA: EMISIONES DE CONTAMINANTES PRIMARIOS, 2008
(En toneladas)



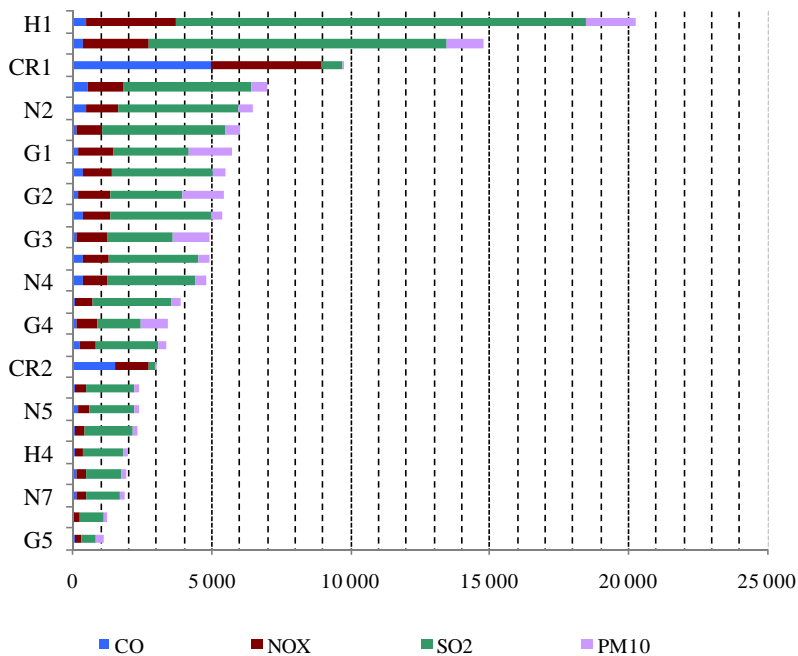
Fuente: Elaboración propia.

Al considerar el total de emisiones asociado a la generación por combustibles fósiles en cada país y la generación específica de cada planta reportada para 2008, se estimaron las emisiones por planta. Ello fue necesario pues no se contó con información específica sobre consumo de combustible para cada una de las plantas en el año base. Este procedimiento significa que las plantas estudiadas corresponden a casos típicos representativos de las condiciones de generación de cada país, aunque se precisa que las emisiones de cada una de las instalaciones pueden variar si se considera el consumo de combustibles específico de cada central.

Es necesario contar con un inventario detallado a nivel de central, y de cada una de las unidades en las centrales, de información sobre los combustibles utilizados (según sus características de contenido de azufre y otros compuestos), así como sobre las tecnologías de combustión y en su caso de control de emisiones, para hacer estudios más detallados que representen con mayor confianza las condiciones de cada planta. Dicho inventario no está disponible para Centroamérica, por lo que en esta evaluación se ha hecho el supuesto de que las centrales existentes no cuentan con tecnologías de control. Se reconoce que este supuesto puede cambiar en los próximos años y que algunas plantas, particularmente las financiadas con fondos internacionales, pueden contar con controles para las emisiones.

Dado que el objetivo de este estudio es tener una primera evaluación de externalidades para Centroamérica con el fin de tener una primera aproximación sobre los impactos ambientales, se considera que los supuestos son razonables, ya que representan las condiciones de las centrales y las emisiones de los países. Las emisiones consideradas para cada central se muestran en el gráfico 7.

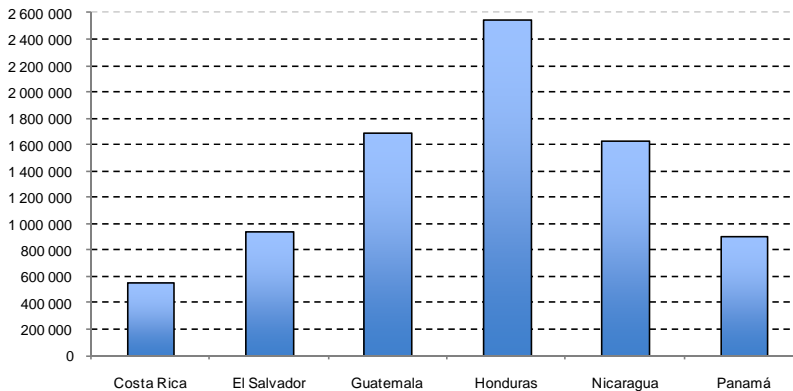
GRÁFICO 7
CENTROAMÉRICA: EMISIONES DE CONTAMINANTES PRIMARIOS DE LAS
CENTRALES SELECCIONADAS, 2008
(En toneladas)



Fuente: Elaboración propia con datos de CEPAL.

Nota: Las siglas del eje Y de este gráfico representan las centrales térmicas consideradas para este estudio. Véase el cuadro 2 en la página 28 para su desglose.

GRÁFICO 8
CENTROAMÉRICA: EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO
DEL SUBSECTOR ELÉCTRICO, 2008
(En toneladas)



Fuente: Elaboración propia.

B. DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES

Como se mencionó, en este estudio se utiliza el modelo RUWM del modelo SIMPACTS, proporcionado por la Agencia Internacional de Energía Atómica. En dicho modelo se incluyen ecuaciones basadas en estudios para simplificar la metodología “vías de impacto” aplicada por la Unión Europea en el proyecto ExternE. Como se explicó en la metodología, el modelo, permite determinar de forma aproximada el impacto físico y los costos en salud humana ante la exposición a contaminantes primarios y secundarios. Resuelve de forma analítica la función de daño. Para la estimación considera información meteorológica promedio o condiciones típicas y asume una rosa de vientos uniforme.

Este modelo mejora las estimaciones del modelo básico SUWM también incluido en el SIMPACTS por medio de la aplicación de cinco coeficientes, que a su vez dependen de las variables más relevantes que influyen en la dispersión de contaminantes: la altura de la chimenea, las características de la localidad (urbana o rural), la velocidad de decaimiento de los gases y de las partículas, entre otros¹⁷. Se precisa que en este estudio se consideró conveniente correr este modelo a fin de poder modelar más plantas y tener una evaluación representativa de los seis países centroamericanos analizados. Sin embargo, en futuros estudios se recomienda aplicar modelos de dispersión más detallados, particularmente en las plantas que en este estudio se identifican como de mayor impacto.

C. FUNCIONES EXPOSICIÓN-RESPUESTA CONSIDERADAS

En rigor, las funciones exposición–respuesta deberían obtenerse en el sitio de la fuente de emisión, para tomar en cuenta la incidencia de factores naturales y socioeconómicos locales. Sin embargo, debido al costo y complejidad de los estudios epidemiológicos, no se cuenta con estudios por sitio, por lo que se recurrió a estudios realizados en otras zonas o países, incluidos algunos meta-análisis, para seleccionar las IRR. El meta-análisis, conocido también como “análisis de análisis”, incluye un conjunto de procedimientos estadísticos que combinan los resultados de varios estudios epidemiológicos independientes, considerados compatibles, con el propósito de integrarlos en un resultado global.

En general, aseverar que la contaminación produce daños en la salud humana pareciera contar con un mayor grado de certeza que atribuir un daño específico a un contaminante en particular. Sin embargo, a nivel mundial, los resultados más consistentes se han encontrado al determinar los efectos de las partículas, las que comprenden una mezcla de contaminantes sólidos o líquidos cuya composición varía de un lugar a otro (Rabl, 2002).

De acuerdo con el enfoque de la metodología ExternE, las funciones exposición-respuesta para las partículas PM_{10} , el SO_2 y el ozono (que no fue considerado en este estudio) se definen de forma independiente, y a partir de ellas se derivan las funciones para $PM_{2.5}$, sulfatos y nitratos.

1. Tasas de incremento de riesgo relativo

En este proyecto se utilizaron como referencia principal los valores de IRR resultantes del meta-análisis del proyecto Ecosistema Urbano y Salud de los Habitantes de la Zona Metropolitana del Valle de México (ECOURS) (César y otros, 2000). Para este meta-análisis se consideraron los estudios publicados sobre efectos en la salud humana por exposición a ozono y PM_{10} en las bases de datos Medline, Pubmed, Biomed–net,

¹⁷ Para mayor detalle sobre los coeficientes de transferencia, consúltese Spadaro, 2002.

Aries, y se incluyó también un análisis de las principales publicaciones mexicanas. Al aplicar criterios de exclusión e inclusión, se seleccionaron un total de 126 estudios. Además, se consideraron las recomendaciones de la metodología del OIEA para el modelo SIMPACTS, elaboradas por Ari Rabl (Rabl, 2002), quien analizó una serie de estudios epidemiológicos relacionados con partículas PM₁₀, y recomendó valores de IRR. Se utilizó también el estudio de Ostro sobre el mismo contaminante publicado por la OMS. Los valores de las tres referencias se muestran en el cuadro 4.

CUADRO 4
INCREMENTO DE RIESGO RELATIVO (IRR) PARA PM₁₀ DE DIFERENTES REFERENCIAS
(En porcentajes de incremento por µg/m³)

Impactos en salud	Población afectada	ECOURS ^a	Rabl ^b	Ostro ^c
1. Mortalidad crónica	+ 30 años	0,384	0,46	0,42
2. Mortalidad aguda	Total	0,101	—	0,123
3. Bronquitis crónica	+ 18 años	0,360	2,14	0,0000612 ^d
4. Admisiones hospitalarias				
Respiratorias	Total	0,139	0,04	0,000012 ^d
Cardio-cerebro vasculares	Total	0,060	0,1	
5. Visitas a salas de urgencia	Total	0,311	—	0,0000235 ^d
6. Días de actividad restringidos	+ 18 años	0,774	0,26	0,3
7. Crisis aguda de asma	Asmáticos	0,774	—	0,059 ^d
8. Tos crónica	Niños	0,030	—	—

Fuente: Especificadas en las columnas respectivas.

^a En el estudio de la zona del Valle de México, los IRR están dados en porcentaje de cambio por cada 10 µg/m³ de PM₁₀, de forma que se volvieron a calcular para este cuadro.

^b Véase Rabl (2002).

^c Véase Ostro (1996).

^d Para este caso, el IRR está dado en número de casos por µg/m³ de PM₁₀ anual. Para compararlos con los valores de los otros estudios de referencia, los IRR del estudio ECOURS y los propuestos por Rabl se multiplicaron por la tasa basal, quedando en casos por µg/m³ de PM₁₀ anual.

Con base en la información analizada se decidió utilizar el IRR de menor valor para cada impacto (véase el cuadro 5), con objeto de realizar una estimación conservadora del daño. En este cuadro no se contempló la mortalidad aguda por PM₁₀, para evitar incurrir en un doble conteo, pues se supone que está incluida en la mortalidad crónica, de acuerdo con la metodología de ExternE.

A partir de las funciones para PM₁₀ se derivaron las correspondientes a PM_{2,5}, sulfatos y nitratos, tomando en consideración los criterios de ExternE en su actualización de 2005. Dichos criterios reparan en las siguientes relaciones de toxicidad para estimar las pendientes de las funciones para los sulfatos y nitratos:

Toxicidad de sulfatos igual a la de PM₁₀ ($S_{\text{FER}} \text{ sulfatos} = S_{\text{FER}} \text{ PM}_{10}$),

Toxicidad de nitratos igual a la mitad de PM₁₀ ($S_{\text{FER}} \text{ nitratos} = 0,5 S_{\text{FER}} \text{ PM}_{10}$).

Estas aproximaciones introducen algunas imprecisiones, ya que se les ha asignado un efecto que corresponde a una mezcla de contaminantes. En realidad, no se puede precisar con exactitud qué contaminante de la mezcla es el responsable de los mayores efectos. Esto se complica si se considera que los estudios epidemiológicos para PM₁₀ se han realizado en la atmósfera de ciudades con diferente

composición química de partículas, y no sólo las provenientes de la generación de electricidad, como es el caso del presente estudio.

No existe información de estudios locales sobre los efectos de los óxidos de azufre en la salud, que pudiera ser utilizada en este estudio. Se decidió así analizar el impacto de estos contaminantes solamente por su contribución en la formación de sulfatos, contaminantes secundarios, cuyo impacto en la salud, como se señaló anteriormente, se trata en este estudio como partículas PM_{10} .

Es por ello que con base en el análisis de otros estudios de referencia, especialmente ExternE, se seleccionaron los impactos que se muestran en el cuadro 5. En dicho cuadro se presentan también los valores de IRR seleccionados para este estudio debido a que conllevan un menor impacto, a fin de realizar una estimación conservadora del daño. Se precisa que para evitar un problema de doble conteo, se decidió utilizar únicamente el impacto de días de actividad restringidos (DAR) y no el indicador de días de trabajo perdidos (DTP). En algunos estudios ambos indicadores se utilizan de forma simultánea, aunque podría existir un problema de doble conteo.

El problema del doble conteo aparece principalmente en el tratamiento de los días de actividad restringidos (DAR) y los días de trabajo perdidos (DTP). Las admisiones hospitalarias y los días de trabajo perdidos se incluyen en los días de actividad restringidos (Rabl, 2002). Por ello, se recomienda calcular un valor de DAR neto, es decir, se debe restar a su valor inicial una porción de los días de trabajo perdidos y las admisiones hospitalarias (respiratorias y cardiovasculares). Al no contar con funciones para los días de trabajo perdidos, se calculó la variación de los costos del daño al usar un valor total de DAR (a pesar de incurrir en doble conteo) o un valor neto de DAR. Se pudo apreciar que el doble conteo no superó 1% de los costos totales, por lo que se decidió considerar la función de días de actividad restringidos sin restar la pérdida laboral por admisiones hospitalarias.

CUADRO 5
IRR SELECCIONADOS PARA PM_{10} , SULFATOS Y NITRATOS

(En porcentajes de incremento en el riesgo relativo por $\mu g/m^3$)

Impactos en salud	Población	IRR para PM_{10} ^a	
		sulfatos	IRR para nitratos
1. Mortalidad crónica	+ 30 años	0,384	0,192
2. Bronquitis crónica	+ 30 años	0,360	0,180
3. Admisiones hospitalarias			
Respiratoria	Total	0,040	0,020
Cardio-cerebro vasculares	+65	0,060	0,030
4. Días de actividad restringidos	+ 20 años	0,260	0,130
5. Crisis aguda de asma	Asmáticos	0,774	0,387
6. Tos crónica	Niños	0,030	0,015

Fuente: (CEPAL-SEMARNAT, 2004 y 2007).

^a Casos por $\mu g/m^3$ de PM_{10} anual.

2. Tasas de incidencia y de mortalidad

Para evaluar la morbilidad se usaron las tasas de referencia de México (CEPAL-SEMARNAT, 2004 y 2007), al no contar con las tasas para cada localidad donde se encuentran las instalaciones analizadas. Emplear las tasas de incidencia de México u otra que no corresponda a la región donde se realiza el estudio no es lo óptimo, pues existen muchos factores locales que inciden en el número de casos de una enfermedad

(factores climáticos, condiciones de vida, hábito de fumar, entre otros), sobre todo en el caso de las enfermedades respiratorias. A pesar de estas restricciones, se acepta internacionalmente el enfoque debido a la falta de información pertinente. Las tasas de incidencia recomendadas para casos de morbilidad se presentan en el cuadro 6.

CUADRO 6
TASAS DE INCIDENCIA DE MORBILIDAD

Efecto en salud por partículas	Tasa basal (casos/personas por año)	Referencia
Bronquitis crónica, nuevos casos	0,00707	ECOURS
Admisiones hospitalarias		
Respiratorias	0,000793	Secretaría de Salud, Anuario 2000 Morbilidad
Cardio-cerebro-vasculares	0,00042	
Días de actividad restringida	6,46	ECOURS
Crisis aguda de asma	0,1274	ECOURS
Tos crónica, prevalencia	0,0577	ECOURS

Fuente: ECOURS, Proyecto *Ecosistema Urbano y Salud de los Habitantes de la Zona Metropolitana del Valle de México* (César y otros, 2000). *Sistema Nacional de Información en Salud*, Anuario Morbilidad, México, 2000.

Respecto de la mortalidad, se encontró el valor de la tasa de mortalidad para cada país. Estas tasas, así como el promedio nacional y las fracciones de población estimadas para cada país se obtuvieron de las bases de datos de la CEPAL (2009b), que se muestran en el cuadro 7.

CUADRO 7
CENTROAMÉRICA: TASAS DE MORTALIDAD POR PAÍS Y GRUPOS POBLACIONALES
RESPECTO DE LA POBLACIÓN TOTAL

País	Tasa de mortalidad ^a	Niños menores de 14 años	Fracción de la población (%) ^b		
			Población mayor a 20 años	Población mayor a 30 años	Población mayor a 65 años
Costa Rica	4,07	0,28	0,61	0,43	0,06
El Salvador	6,80	0,35	0,55	0,39	0,07
Guatemala	5,67	0,43	0,46	0,18	0,03
Honduras	5,06	0,40	0,49	0,31	0,03
Nicaragua	4,73	0,38	0,51	0,32	0,04
Panamá	5,03	0,30	0,60	0,44	0,06

Fuente: CELADE (Centro Latinoamericano y Caribeño de Demografía), División de Población de la CEPAL, Revisión 2008. Base de datos de población.

^a Tasa por 1.000 habitantes.

^b La fracción de la población por grupos de riesgo para cada estado se determinó con información de CELADE. La fracción de la población asmática se consideró que era igual a 6% de la población de cada país de acuerdo con estudios epidemiológicos a nivel subregional.

D. COSTOS ECONÓMICOS DE MORBILIDAD Y MORTALIDAD

1. Morbilidad

Las condiciones propias del lugar en que se brindan los servicios médicos y los aspectos socioeconómicos de la población atendida influyen altamente en el costo de la atención a casos de enfermedad. El Instituto Nacional de Salud Pública de México realizó un estudio que considera los costos del nivel III de atención (el más completo) del Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS) para algunas enfermedades. Dichos costos han sido utilizados en estudios de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y el Instituto Nacional de Ecología de México, así como por Cuba Energía, centro de investigación en energía y medio ambiente en Cuba (Mackinley y otros, 2003; CEPAL-SEMARNAT, 2004, y CEPAL-SEMARNAT, 2007). Es importante aclarar que en el presente estudio no se analizan los costos para cada país y que no todas las zonas de influencia de las termoeléctricas cuentan con el nivel de atención similar al mencionado. Se requiere profundizar en estos estimados para considerar, por ejemplo, otros niveles de atención y los costos incurridos por las instancias sanitarias en cada país.

En el presente estudio se consideraron los valores de costo directo de la enfermedad obtenidos por el Instituto Nacional de Salud Pública de México y los transfirió a cada uno de los países mediante un coeficiente de transferencia que considera la razón de la paridad del poder de compra per cápita entre cada uno de los países de Centroamérica y México. Pese a sus limitaciones, se considera que esta información es mejor que la estimada indirectamente por medio de los datos de la Unión Europea o los Estados Unidos, al ser México un país en desarrollo en América Latina.

Para evaluar la pérdida de productividad se consideró el salario mínimo vigente en 2008 en cada uno de los países y los días de actividad perdidos considerados en cada caso, tomando como referencia el estudio de McKinley, salvo las admisiones hospitalarias cardio-cerebro-vasculares, para las que se utilizó el estudio de ECOURS. Así se consideraron siete días perdidos por cada caso de bronquitis crónica y ocho por cada admisión hospitalaria. Para el caso de los días de actividad restringida, se tomó un día de salario perdido.

Finalmente, para evaluar la voluntad a pagar, ni en la subregión ni en América Latina existen estudios dedicados a los impactos en la morbilidad. Por tal motivo, se decidió transferir la voluntad a pagar del estudio de ExternE al usar el coeficiente de transferencia correspondiente entre Europa y cada país centroamericano. Se precisa que para el caso de días de actividad restringido sólo se consideró el componente de voluntad a pagar, que excluye el salario europeo. Como se explicó, se consideró dicho utilizando el salario mínimo por día en cada país.

En el cuadro 8 se presentan los diversos costos de los impactos evaluados: costos directos de la enfermedad (CD), pérdidas de productividad (PP) y voluntad a pagar, desglosados para cada país. Además, se indica el valor de los costos unitarios en México y de los transferidos de la UE, presentados en el cuadro con fines comparativos. Asimismo, se incluye el cuadro 9 en que se indican los coeficientes de transferencia entre los países centroamericanos y México, la Unión Europea y los Estados Unidos. Esto último con fines comparativos y en caso de tener el deseo de evaluar los costos transferidos de los Estados Unidos, que en general son más elevados, razón por la que no se utilizaron en este estudio. Se precisa que todos los costos utilizados fueron actualizados a dólares de 2008¹⁸.

¹⁸ Se utilizó el factor elaborado por la Universidad de Oregon (<http://oregonstate.edu/cla/polisci/faculty-research/sahr/cv2006.pdf>).

CUADRO 8
MÉXICO Y CENTROAMÉRICA: COSTOS UNITARIOS PARA CASOS DE MORBILIDAD
(En dólares de 2008)

Efecto	Costos de enfermedad ^a	Pérdida de productividad ^b	Voluntad a pagar ^{a c}	Total
México				
Bronquitis crónica	21 597	145	91 434	113 177
Ingresos hospitalarios por enfermedad respiratoria	2 664	165	214	3 043
Ingresos hospitalarios por problema cardiovascular	13 251	83	214	13 548
Tos crónica			93	93
Crisis aguda de asma	385	21	99	505
Días de actividad restringida		21	23	43
Costa Rica				
Bronquitis crónica	16 573	108	70 590	87 271
Ingresos hospitalarios por enfermedad respiratoria	2 175	124	743	3041
Ingresos hospitalarios por problema cardiovascular	13 251	124	743	14 118
Tos crónica			249	71
Crisis aguda de asma	897	15	71	961
Días de actividad restringida		15	104	119
El Salvador				
Bronquitis crónica	8 853	57	42 999	51 909
Ingresos hospitalarios por enfermedad respiratoria	1 092	66	453	1 610
Ingresos hospitalarios por problema cardiovascular	5 432	66	453	5 950
Tos crónica			43	294
Crisis aguda de asma	92	8	17	117
Días de actividad restringida		8	37	45
Guatemala				
Bronquitis crónica	7 098	76	30 234	37 409
Ingresos hospitalarios por enfermedad respiratoria	875	87	318	1 281
Ingresos hospitalarios por problema cardiovascular	4 355	87	318	4 760
Tos crónica			31	31
Crisis aguda de asma	127	11	21	158
Días de actividad restringida		11	45	56

(Continúa)

CUADRO 8 (conclusión)

Efecto	Costos de enfermedad ^a	Pérdida de productividad ^b	Voluntad a pagar ^{a c}	Total
Honduras				
Bronquitis crónica	5 137	84	24 948	30 169
Ingresos hospitalarios por enfermedad respiratoria	634	96	263	992
Ingresos hospitalarios por problema cardiovascular	3 152	96	263	3 510
Tos crónica			25	25
Crisis aguda de asma	92	12	17	121
Días de actividad restringida		12	37	49
Nicaragua				
Bronquitis crónica	3 965	61	16 890	20 855
Ingresos hospitalarios por enfermedad respiratoria	489	70	178	667
Ingresos hospitalarios por problema cardiovascular	2 433	70	178	2 611
Tos crónica			17	17
Crisis aguda de asma	71	9	12	82
Días de actividad restringida		9	25	25
Panamá				
Bronquitis crónica	17 632	114	75 103	92 848
Ingresos hospitalarios por enfermedad respiratoria	2 175	130	791	3 095
Ingresos hospitalarios por problema cardiovascular	10 818	130	791	11 738
Tos crónica			76	76
Crisis aguda de asma	315	16	51	382
Días de actividad restringida		16	111	127

Fuente: Se especifica en cada llamada.

^a McKinley y otros (2003), Tabla VI.5, Health values for each outcome (dólar por caso). Los costos directos de enfermedad son los del IMSS considerando el nivel III de atención para 2001.

^b La pérdida de productividad (PP) se calculó considerando únicamente la pérdida laboral, con la base del salario mínimo de 2008 para cada uno de los países, con datos del Departamento de Estado de los Estados Unidos, en sus reportes sobre el estado de los derechos humanos.

^c Los valores de voluntad a pagar se tomaron del estudio Externalidades de la Energía (*ExternE Externalities of energy*), de la Unión Europea, en su actualización de 2005, y se transportaron a cada país el coeficiente de transferencia correspondiente y la elasticidad ingreso igual a la unidad. Los valores en ExternE son 190.000 euros por caso de bronquitis crónica, 2000 euros por hospitalización, de 130 a 280 euros por casos de asma (se tomó 130) y 130 euros por Día de Actividad Restringida. Este último tiene dos componentes: 88 euros por pérdida de productividad y 49 por voluntad a pagar; este último valor fue el que se transfirió a cada país y se sumó con la pérdida de productividad igual a un día de salario mínimo.

CUADRO 9
PAÍSES SELECCIONADOS: COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE COSTOS

País	Coeficiente de transferencia con INB per cápita		
	PPA_INB per cápita_País/PPA_INB per cápita_MEX	PPA_INB per cápita_País/PPA_INB per cápita EU	PPA_INB per cápita_País/PPA_INB per cápita EURO
Costa Rica	0,767	0,233	0,330
El Salvador	0,467	0,142	0,201
Guatemala	0,329	0,100	0,141
Honduras	0,271	0,082	0,116
Nicaragua	0,184	0,056	0,079
Panamá	0,816	0,248	0,351
México	1,000	0,304	0,429
Estados Unidos	3,292	1,000	1,414
Europa	2,329	0,707	1,000

Fuente: Elaboración propia con datos del Banco Mundial, *World Development Indicators*.

2. Mortalidad

Como se señaló anteriormente, el presente estudio se basó en el enfoque de Años de Vida Perdidos (AVP), empleado en el proyecto ExternE, en el que se determinó el valor de un AVP sobre la base del Valor Estadístico de la Vida estimado para la población europea. La última actualización de ExternE de 2005 considera un valor de 50.000 euros por AVP.

En el presente estudio se utilizan los estudios disponibles en México para estimar el Valor Estadístico de la Vida, por ser un país más afín a los centroamericanos. Se utilizó el valor de un AVP crónico estimado en estudios mexicanos (CEPAL-SEMARNAT, 2007). Para estimar el AVP para cada país centroamericano se consideró la relación de la paridad del poder adquisitivo del ingreso nacional bruto per cápita con respecto al de México (véase el cuadro 10) y el coeficiente de elasticidad-ingreso igual a la unidad¹⁹. Los resultados se presentan por país en el cuadro 10; se anexa una columna del valor transferido de ExternE a fin de mostrar que los estimados transferidos son relativamente consistentes.

¹⁹ (<http://www.worldbank.org/data/>).

CUADRO 10
CENTROAMÉRICA Y MÉXICO: VALOR DE UN AÑO DE VIDA
PERDIDO CRÓNICO POR PAÍS
(En dólares de 2008)

País	Estudio CEPAL-SEMARNAT	Estudio ExternE 2005
Costa Rica	11 529	16 477
El Salvador	7 023	10 000
Guatemala	4 938	7 057
Honduras	4 075	5 823
México	15 025	21 473
Nicaragua	2 759	3 942
Panamá	12 266	17 531

Fuente: Elaboración propia con base en el costo del AVP estimado para México (CEPAL-SEMARNAT, 2007), el costo del AVP de ExternE 2005 y los datos del Banco Mundial para estimar los coeficientes de transferencia (véase el cuadro 9).

Asimismo, se supuso que un caso de muerte crónica equivale a 10 AVP como propone la Metodología Simplificada de ExternE (Spadaro, 2002).

III. RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados de la aplicación de la metodología simplificada, ExternE, para evaluar los costos externos de salud en Centroamérica. Se incluye el daño total generado, desglosado por tipo de contaminante y valor de las externalidades (centavos de dólar/kWh). Además, se agrega una estimación indirecta del costo por emisiones de GEI a fin de incluir en un estimador global los impactos locales, regionales y globales. Sin embargo, como dicho costo se presenta por separado y en conjunto, debido a que la metodología es indirecta y no la metodología vías de impacto, esto se debe considerar en el análisis de resultados. Finalmente se presenta un análisis comparativo que explica algunas diferencias importantes entre los distintos países y los indicadores subregionales.

A. EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LAS EXTERNALIDADES

Con los resultados del modelo SIMPACTS y siguiendo la Metodología Vías de Impacto, se calculó el impacto físico en cada uno de los sitios receptores (casos por año). Para evaluar los costos externos en la salud se tomaron, para los casos de morbilidad, la suma de los costos directos de la enfermedad más la pérdida de productividad y la voluntad a pagar; para el caso de mortalidad, se consideró el valor de un año de vida perdida en 10 años de vida perdidos por caso de enfermedad crónica. Con dichos datos se estimaron los costos totales de las externalidades para cada una de las 25 centrales estudiadas.

Llevar a cabo el modelo SIMPACTS proporcionó información del valor de las externalidades por efectos en la salud. En el estudio se estimaron los costos externos de las plantas seleccionadas, en 2008, en el orden de los 20,3 millones de dólares²⁰ anuales, sólo considerando el impacto en la salud. Este monto equivale a 0,02% del PIB de los países en el año de referencia. Las centrales identificadas como H1, P1, P2, y ES1 presentaron las mayores externalidades superando los 1,5 millones de dólares cada una.

Se encontró que las emisiones de SO₂ arrojan los mayores costos externos (59% del total), seguido de las partículas (29%) y finalmente los NO_x (12%). La internalización de las externalidades en el precio de la electricidad implicaría aumentar entre 0,09 y 0,27 centavos de dólar por kWh, es decir, entre 1,83% y 5,35% del costo del kWh. El costo externo ponderado, en función de la generación de las 25 centrales de producción, sería de 0,14 centavos de dólar por kWh. Esto si se considera únicamente el impacto local y subregional en la salud de la población analizada.

Los costos más elevados se presentaron en las plantas H1, P1, P2, y ES1, que son cuatro de las centrales de mayor emisión de la subregión, mientras los más bajos fueron los de N4, N5, N6, y N7. Hay que señalar que dichos costos dependen en gran medida de la densidad de población. Las áreas de impacto local de ES4, ES2 y ES3 son las más pobladas, mientras que las menos pobladas son H1, G3 y G4.

²⁰ Se refiere siempre a dólares de 2008.

CUADRO 11
CENTROAMÉRICA: COSTOS EXTERNOS POR ZONA Y CONTAMINANTE
(En miles de dólares/año)

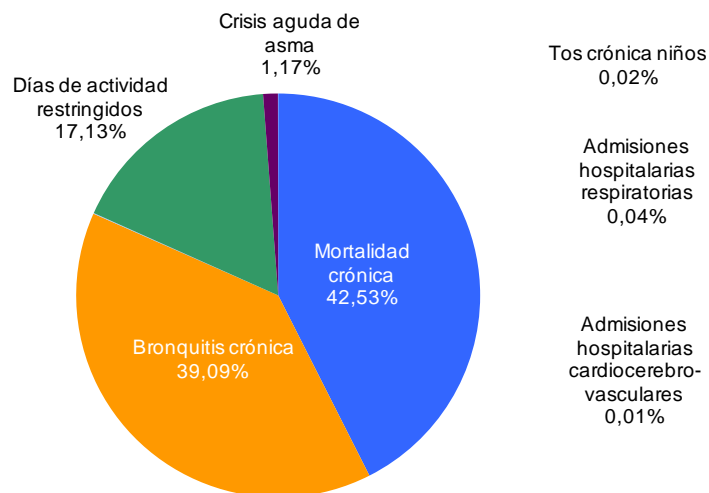
Central ^a	PM10	Nitratos	Sulfatos	Total	Centavos de dólar/kWh
CR1	19	637	226	881	0,19
CR2	15	174	61	250	0,17
ES1	379	118	1 114	1 611	0,20
ES2	542	82	771	1 395	0,27
ES3	218	53	501	772	0,25
ES4	169	25	238	433	0,27
G1	561	126	543	1 230	0,12
G2	630	115	497	1 242	0,13
G3	308	97	418	823	0,09
G4	240	75	326	641	0,11
G5	83	19	83	185	0,10
H1	232	174	1 598	2 004	0,10
H2	430	117	1 074	1 621	0,11
H3	37	18	167	223	0,09
H4	63	15	139	218	0,11
N1	161	57	413	631	0,11
N2	92	52	380	525	0,10
N3	130	40	291	461	0,12
N4	62	37	265	363	0,09
N5	31	18	132	180	0,10
N6	26	16	114	156	0,10
N7	25	14	105	144	0,10
P1	623	127	933	1 682	0,25
P2	480	137	1 005	1 621	0,25
P3	297	85	621	1 002	0,25
TOTAL	5 854	2 428	12 015	20 298	

Fuente: Elaboración propia.

^a Para la identificación de las siglas, véase el cuadro 2 en la página 28.

Los costos presentados incluyen únicamente el efecto de las emisiones en la salud humana, sin considerar su impacto en materiales, cultivos, ecosistemas, bosques, o en el calentamiento global. Se observa que el impacto de los contaminantes secundarios, en particular sulfatos y en menor escala nitratos, que tienen su mayor efecto en el dominio regional, más allá de los 50 km alrededor de la central eléctrica, determinan principalmente los costos en la salud. En el caso de las 25 zonas estudiadas, el impacto regional estimado por el SIMPACTS debido a los contaminantes, representa 80,66% de los costos totales en salud para el conjunto de las plantas, cifra comparable a la obtenida en el proyecto ExternE para los casos de Francia y México (Comisión Europea, 1998). Por otro lado, el costo por mortalidad representó 43% de las externalidades, la bronquitis crónica contribuyó con 39%, los días de actividad restringida con 17% y el resto se repartió entre los demás efectos estudiados. Se observa una menor contribución de la mortalidad al total de las externalidades que en estudios de referencia, lo cual se relaciona con un mayor porcentaje de población en la subregión menor a 30 años y con menores valores de AVP para los países estudiados.

GRÁFICO 9
CONTRIBUCIÓN A LAS EXTERNALIDADES DE LOS
IMPACTOS SELECCIONADOS, 2008
(En toneladas)

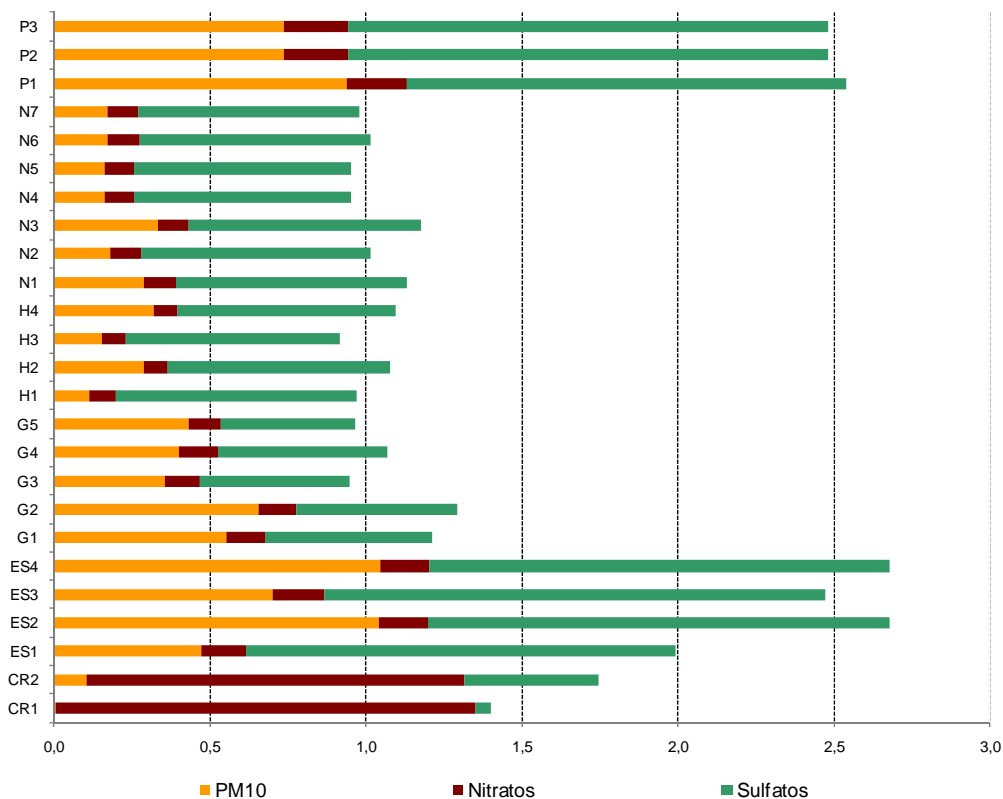


Fuente: Elaboración propia.

Aun cuando las emisiones no sean muy elevadas para cierta región, el modelo reporta un impacto local debido a que se utilizan funciones exposición-respuesta de tipo lineal sin umbral. Por su parte, el impacto regional puede llegar a ser muy importante, ya que los contaminantes son transportados a grandes distancias y afectan la salud de un número elevado de personas en un área de influencia mayor.

Como se mencionó, a partir del cálculo de la externalidad total por cada central, se estimó el costo específico por kWh generado por planta, que oscila entre 0,09 y 0,27 centavos de dólar (véase el cuadro 11). Son los costos totales en salud y por los niveles de generación los que determinan estos valores. Por esta razón, los costos deben considerarse como costos típicos promedio de las centrales en cada país, debido a que se requiere un inventario más detallado de emisiones a nivel de cada planta. Como se muestra en el gráfico 10, no necesariamente las centrales con mayor impacto en términos de externalidades son las que arrojan los mayores costos específicos, debido a su alto nivel de generación eléctrica. El valor ponderado del costo externo en razón de las producciones de las 25 centrales es de 0,14 centavos de dólar por kWh. Además, se calculó el costo externo por cada uno de los contaminantes emitidos para cada central (véase de nuevo el gráfico 7), y se encontró que el SO₂ tiene la mayor contribución en el total de daños a la población.

GRÁFICO 10
CENTROAMÉRICA: EXTERNALIDADES POR CADA CONTAMINANTE EMITIDO
(En centavos de dólar/kWh)



Fuente: Elaboración propia.

Nota: Para la identificación de las siglas en el eje y, véase el cuadro 2 en la página 28.

Además, se calculó el costo por tonelada de contaminante emitido. Esta información es importante si se pretendiera internalizar la externalidad por medio de impuestos directos por tonelada de emisión de contaminantes. Las centrales en El Salvador presentaron los mayores costos externos por tonelada de PM_{10} , las de Panamá para SO_2 y las centrales en Costa Rica para NO_x . En el caso de El Salvador, esto se explica por una alta densidad poblacional, mientras que en el de Panamá a las altas emisiones de SO_2 de sus plantas, y en el de Costa Rica a que es el país con mayores emisiones de NO_x , por mayor uso de gas natural.

CUADRO 12
CENTROAMÉRICA: COSTO POR TONELADA DE CONTAMINANTE
EMITIDA DE CADA CENTRAL
(En dólares/toneladas)

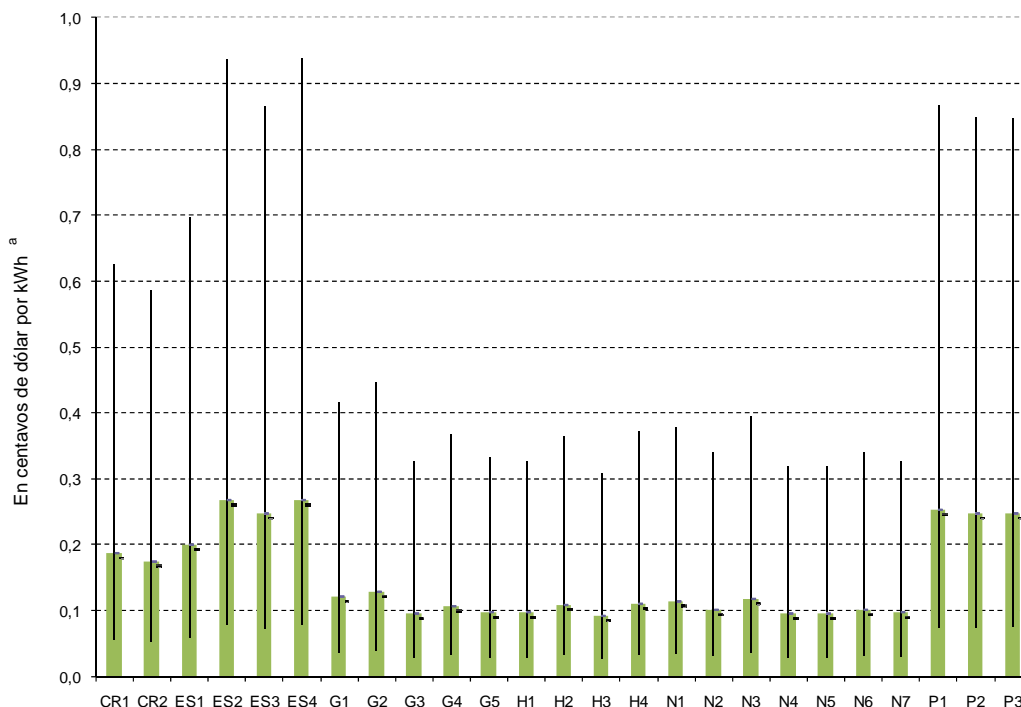
Central ^a	NO _x	SO ₂	PM ₁₀
CR1	160	286	415
CR2	144	257	1 098
ES1	126	251	701
ES2	135	270	1 556
ES3	146	292	1 044
ES4	134	269	1 564
G1	100	200	353
G2	96	193	419
G3	90	180	227
G4	101	203	255
G5	81	161	276
H1	54	108	129
H2	50	100	328
H3	48	96	176
H4	49	98	366
N1	45	89	286
N2	44	88	177
N3	45	90	328
N4	42	84	161
N5	42	84	161
N6	45	89	169
N7	43	86	168
P1	128	255	1 404
P2	139	279	1 098
P3	139	279	1 097
Promedio	93	154	419

Fuente: Elaboración propia.

^a Para la identificación de las siglas, véase el cuadro 2 en la página 28.

Se calculó también un rango de incertidumbre en los costos externos para cada planta, lo que supone una desviación geométrica estándar para cada caso en función del tipo de impacto: cuatro para la mortalidad crónica y tres para la morbilidad. Así se obtuvo un estimado superior y uno inferior. Con esta información se calcularon los rangos de incertidumbre para las externalidades por kWh para todas las plantas. El costo externo para la central ES4 tendría un valor estimado de 0,27 centavos de dólar por kWh, con un rango de incertidumbre de entre 0,08 y 0,94 centavos de dólar por kWh, mientras que para la central H3, con un valor estimado de 0,09 centavos de dólar por kWh, se ubicaría entre 0,03 y 0,31 centavos de dólar por kWh (véase el gráfico 11).

GRÁFICO 11
CENTROAMÉRICA: RANGO DE INCERTIDUMBRE DE LOS COSTOS
EXTERNOS DE CADA CENTRAL



Fuente: Elaboración propia.

a Los rangos de incertidumbre para cada central termoeléctrica se representan por los respectivos segmentos de línea vertical.

Nota: Para la identificación de las siglas en el eje horizontal x, véase el cuadro 2 en la página 28.

B. EXTERNALIDADES POR EMISIONES DE CO₂

En la actualidad el tema de las emisiones de cambio climático ha tomado una relevancia de primer orden debido a los reportes del IPCC que muestran la gran severidad de los daños en todo el mundo, y en particular, en las regiones más vulnerables. Si bien los países centroamericanos son países en desarrollo, la *Estrategia 2020* contempla ya un análisis de su contribución de emisiones de GEI y la necesidad de sentar las bases para un desarrollo sustentable que asuma las afectaciones ambientales del subsector electricidad, entre otras acciones, por medio del fomento del uso de energías renovables.

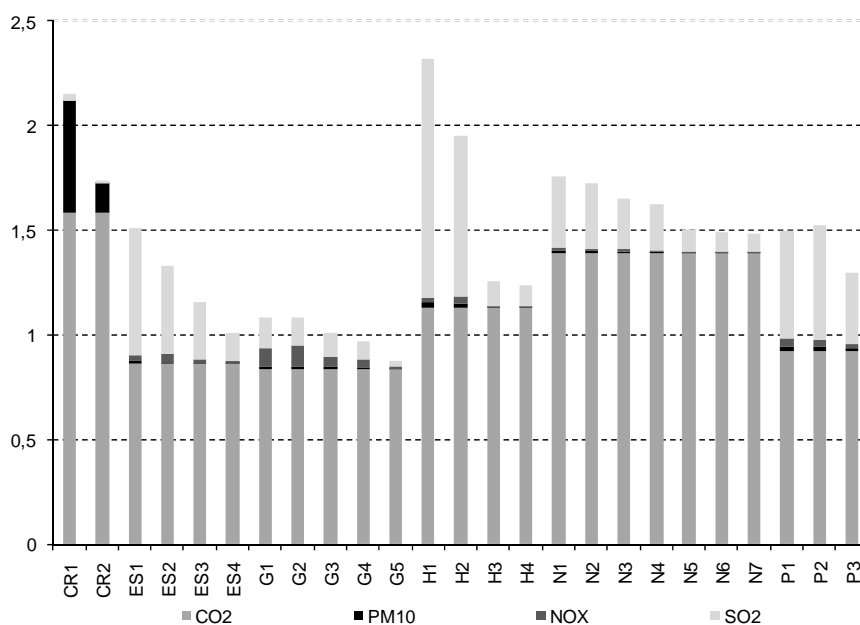
A fin de ser consistente con la *Estrategia 2020* se tomará el valor de 20 dólares por tonelada de CO₂ emitido. Como se señala en la estrategia, esta estimación se seleccionó al considerar el valor promedio de costos de mitigación disponible en diversos países. Es, por tanto, un “precio sombra”, en el que se utiliza el método de tecnologías de control. Sin embargo, a nivel internacional, existe una discusión abierta sobre el costo que se debe aplicar a una tonelada de emisión de GEI, que ha llevado al desarrollo de múltiples y complejos modelos de valoración integrada que buscan combinar los modelos climáticos con los macroeconómicos para determinar el costo social del carbón, es decir, el daño marginal que genera en la economía la emisión de una tonelada de GEI. Por el carácter intertemporal del problema del cambio climático, las estimaciones son complejas pues requieren modelar los costos de abatimiento y

los daños del cambio climático en horizontes temporales de cientos de años. En ausencia de costos específicos modelados para la subregión, podría utilizarse el resultado de estos modelos a nivel global, asumiendo que los daños son globales.

En relación con el costo por CO₂, las externalidades para cada una de las centrales se presentan en el gráfico 12.

GRÁFICO 12
CENTROAMÉRICA: EXTERNALIDADES CONSIDERANDO EMISIONES DE GASES DE EFECTO
INVERNADERO DE LAS CENTRALES

(En centavos de dólar/kWh)



Fuente: Elaboración propia.

Nota: Para la identificación de las siglas en el eje x, véase el cuadro 2 en la página 28.

Las externalidades para las plantas estudiadas aumentarían a 221,6 millones de dólares en 2008. Si se considera el conjunto de las centrales, el impacto por cambio climático contribuye con 68%, el SO₂ con 28% y PM₁₀ y NO_x con 2% cada uno. Si se incluye el impacto del cambio climático calculado indirectamente mediante un precio de referencia de 20 dólares por tonelada de CO₂²¹, el costo de las externalidades aumentaría entre 0,87 y 2,32 centavos de dólar por kWh. El promedio ponderado por la generación de las centrales analizadas es de 1,57 centavos de dólar por kWh, al considerar los impactos por contaminantes primarios y secundarios y por GEI.

²¹ Este valor fue utilizado como referencia en la *Estrategia Energética Sustentable Centroamérica 2020*.

IV. ANÁLISIS DE EXTERNALIDADES EN ESCENARIOS DEL PLAN INDICATIVO REGIONAL DE EXPANSIÓN DE LA GENERACIÓN, 2009-2023 DEL CEAC

El objetivo general de la *Estrategia Energética Sustentable Centroamericana 2020*²² es asegurar el abastecimiento energético de Centroamérica, en calidad, cantidad y diversidad de fuentes, necesario para garantizar el desarrollo sostenible, sin olvidar la equidad social, el crecimiento económico, la gobernabilidad y compatibilidad con el ambiente, de acuerdo con los compromisos ambientales internacionales. Entre sus objetivos específicos se encuentran:

- 1) Reducir la dependencia energética de fuentes importadas por medio del aumento de la oferta de fuentes renovables de energía.
- 2) Incorporar nuevas tecnologías y fuentes de energía menos contaminantes.
- 3) Mitigar los efectos del uso y producción de energía sobre el ambiente.
- 4) Desarrollar proyectos energéticos con recursos naturales compatibles con el ambiente y con los asentamientos humanos.

Incorporar las externalidades ambientales incide directamente en la promoción de fuentes de energía que reducen las emisiones de contaminantes al medio ambiente y/o en la introducción de tecnologías de control de la contaminación mediante normas ambientales que limiten la emisiones y con ello catalicen la modernización del parque eléctrico. Además de las normas técnicas sobre límites de emisión, existen instrumentos económicos que pueden lograr los objetivos referidos. Al no estar incorporadas actualmente las externalidades en el precio de los combustibles o de la electricidad, se genera una sobredemanda de fuentes de generación con amplios impactos sobre el medio ambiente, como se ha analizado en este estudio.

Las externalidades ambientales no han sido incorporadas al precio de la electricidad por dos razones fundamentales: 1) la complejidad de su estimación, y 2) el impacto económico que se derivaría. Como se ha demostrado en este estudio existen metodologías que permiten sistematizar la información sobre los impactos y realizar estimados, que si bien son inciertos, permiten identificar daños y asociarlos con distintas tecnologías en magnitudes dependientes de parámetros técnicos y económicos. Por la relevancia que ha tomado el cambio climático en el ámbito internacional, diversas estimaciones sobre el impacto de las emisiones de GEI se encuentran ya disponibles a nivel internacional. Sin embargo, pocos estudios han analizado de forma integrada los impactos de los contaminantes locales y regionales en países en desarrollo. A fin de lograr un desarrollo sustentable y equilibrado es preciso avanzar en la discusión de dichos impactos en los territorios nacionales y su relación con las decisiones tecnológicas.

Por medio del Plan Indicativo Regional de Expansión de la Generación, Período 2009-2023, el CEAC ha realizado ya un esfuerzo de integrar al análisis de los escenarios de expansión del sistema los costos asociados a las emisiones de CO₂. Este estudio se suma a dichos trabajos para aportar elementos que permitan estudiar el impacto de la contaminación por partículas PM₁₀, de óxidos de azufre (SO₂) y de óxidos de nitrógeno (NO_x). La emisión de estos contaminantes se asociará únicamente a la generación térmica objeto de este estudio.

²² Aprobada por los Ministros de Energía de los países participantes en la reunión del 13 de noviembre de 2007 (véase CEPAL, 2007).

A. ANÁLISIS DE ESCENARIOS DEL PLAN INDICATIVO

El plan indicativo contiene un total de nueve escenarios modelados para el subsector eléctrico centroamericano. La modelación partió de una línea base que considera la situación del sector en la subregión en 2008 (última actualización) y los proyectos en marcha en 2009 que son inamovibles²³. A partir de dicho año se modeló el sistema centroamericano con la consideración del crecimiento económico esperado en escenarios alto y medio, las expectativas sobre comportamiento de precios de los combustibles de la Agencia Internacional de Energía, los escenarios alto y medio de crecimiento de la demanda y las restricciones sobre aumentos en la capacidad instalada de distintas tecnologías, en particular restricciones al desarrollo hidroeléctrico y a plantas genéricas renovables. Los casos analizados con variaciones en estas variables se describen en el cuadro 13.

CUADRO 13
CASOS EVALUADOS EN LA MODELACIÓN DEL PLAN INDICATIVO REGIONAL

Caso	Supuestos de modelación
A	Supone que el desarrollo hidroeléctrico estará limitado a plantas de tamaño regular, que la demanda crecerá según el escenario medio y que los precios de los combustibles evolucionarán también según dicho escenario. No tiene interconexión con Colombia y no considera el grupo de plantas genéricas pequeñas. La restricción media al desarrollo hidroeléctrico sólo tiene como candidatas plantas menores de 150 MW, cuyo costo de inversión es menor a 300 millones de dólares, lo que simula un grado medio de restricciones financieras.
B	En este caso se elimina la restricción media a la entrada de plantas hidroeléctricas y están disponibles como candidatos todos los proyectos hidroeléctricos identificados en la base de datos del GTPIR.
C	En este caso se impone una restricción fuerte al desarrollo de hidroeléctricas. Sólo puede tomar como candidatas plantas de menos de 75 MW, cuyo costo de inversión es inferior a 150 millones de dólares, lo que simula restricciones financieras mayores para desarrollar proyectos hidroeléctricos por riesgos, efectos ambientales, entre otros.
D	En este caso se analiza la interconexión de Panamá con Colombia. Define el enlace de 300 MW en ambos sentidos, que entrará en operación en 2013.
E	En este caso se supone un escenario de precios altos de los combustibles, debido al riesgo de sufrir una nueva alza mundial en los precios de los hidrocarburos.
F	En este caso se presume un escenario de crecimiento alto de la demanda para simular desarrollos mayores de los factores económicos y demográficos que afectan la demanda.
G	Este caso tiene dos variaciones sobre el caso base, o Caso A. Conjetura el escenario sin restricción a la entrada de hidroeléctricas, como el Caso B, y el escenario de combustibles altos, como el Caso E.
H	En este caso se analiza el valor de las plantas renovables, representadas como proyectos agregados de 100 MW, aquí descritas como renovables genéricas, con el propósito de simular el efecto de las políticas que favorecen el desarrollo de pequeñas y medianas centrales hidroeléctricas y geotérmicas.
I	En este caso sólo se considera el desarrollo de plantas candidatas térmicas. Se analiza el caso extremo de no desarrollar proyectos de energía renovables.

Fuente: CEAC, 2009, *Plan indicativo regional de expansión de la generación, período 2009-2023*.

²³ La modelación de la expansión del sistema se realizó por medio de los modelos SUPER-OLADE, OPTGEN 4,05 y SDDP 9,1.

B. REVISIÓN DE LOS COSTOS DE PRODUCCIÓN DE ELECTRICIDAD²⁴

A partir de la información del informe del CEAC, se sabe que los escenarios de precios de los combustibles fósiles considerados en los casos se refieren a los precios que se presentan en el cuadro 14. Se encuentra que un supuesto fundamental del ejercicio de modelación del CEAC es la disponibilidad de los combustibles necesarios para expandir el sistema, lo que le permite, por ejemplo, proyectar bajo algunos escenarios importantes adiciones a la capacidad con base en plantas a gas natural.

CUADRO 14
ESCENARIOS MEDIO Y ALTO DE PRECIOS DE LOS COMBUSTIBLES, 2009-2023
(En dólares/GJ)

Año	Medio				Alto			
	Diésel	Búnker	Carbón	GNL	Diésel	Búnker	Carbón	GNL
2009	14,54	7,92	4,04	7,6	15,74	8,65	4,05	8,3
2010	16,72	8,79	4,07	8,39	19,41	10,15	4,1	9,27
2011	18,46	9,82	4,1	8,37	22,76	12,36	4,13	9,74
2012	20,08	10,87	4,17	8,6	26,14	15,23	4,22	9,7
2013	20,72	11,37	4,19	8,62	29,05	18,13	4,23	9,92
2014	22,68	12,49	4,24	8,78	33,42	21,12	4,29	10,12
2015	23,44	12,89	4,29	8,89	35,43	22,27	4,38	10,42
2016	23,78	13,03	4,34	9,07	36,94	23,03	4,42	10,69
2017	23,85	12,99	4,36	9,25	37,09	23,62	4,49	10,82
2018	24,24	13,2	4,4	9,54	38,2	24,63	4,55	10,97
2019	24,42	13,22	4,36	9,77	37,73	24,12	4,55	10,83
2020	24,25	13,14	4,32	9,61	37,79	24,3	4,44	10,91
2021	24,35	13,27	4,34	9,37	37,1	24,16	4,52	11,07
2022	24,72	13,41	4,38	9,58	37,46	23,8	4,63	11,24
2023	25	13,53	4,39	9,66	37,79	24,81	4,73	11,53
Nivelado ^a	20,63	11,19	4,21	8,73	28,78	17,5	4,29	9,98

Fuente: CEAC (2009), *Plan indicativo regional de expansión de la generación, período 2009-2023*.

^a El precio nivelado que se indica en la última línea es el precio medio de la proyección, ponderado con una tasa de descuento del 12%.

Como en la estrategia misma se menciona, existen algunos problemas asociados con este supuesto sobre disponibilidad de la infraestructura necesaria para transportar y ofrecer el gas natural. Asimismo al revisar los costos de producción de electricidad se encuentra que es muy importante para el tema ambiental monitorear: 1) el precio relativo de los energéticos, y 2) la efectiva disponibilidad de gas natural. El primer tema se refiere particularmente al costo del carbón, ya que al subir el petróleo y sus derivados se puede esperar que el uso de dicho combustible crezca, particularmente ante bajas disponibilidades de gas natural. El monitoreo de la disponibilidad de gas natural es clave para la regulación ambiental, puesto que si las inversiones necesarias para transportarlo no se realizan a tiempo, se podría caer en la situación de obtener mayores plantas a carbón de las esperadas en la prospectiva.

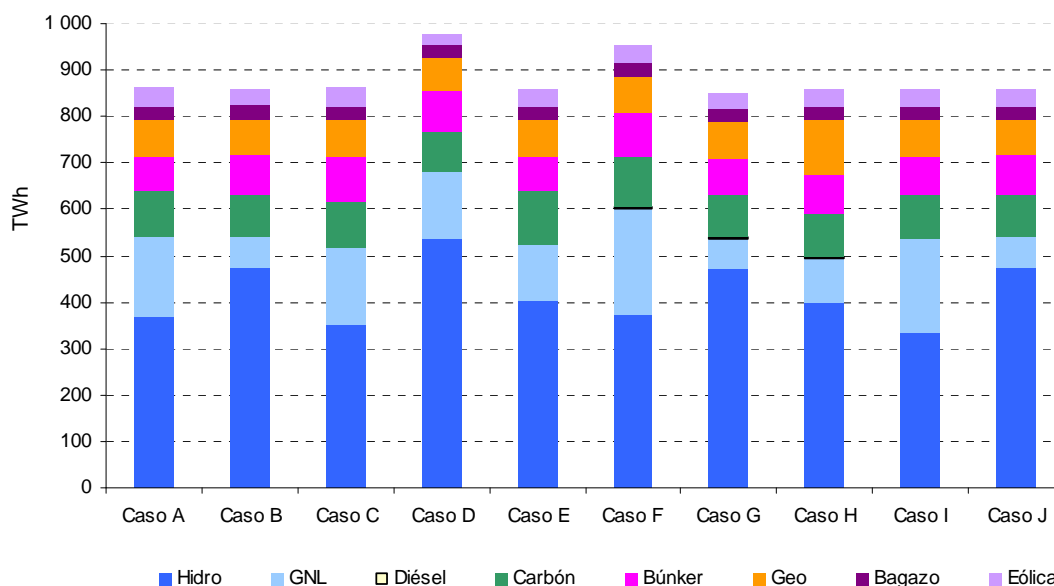
²⁴ A partir de costos unitarios y escenarios de precios de los energéticos.

Dado que la vida útil de dichas plantas es larga, con períodos de hasta 20 años, la falta de disponibilidad oportuna del combustible puede tener repercusiones en el largo plazo.

C. RESULTADOS DEL PLAN INDICATIVO Y COMPARACIÓN DE COSTOS CON Y SIN EXTERNALIDADES

Los resultados de la modelación repercutieron sobre el costo de inversión y de mantenimiento de las distintas opciones de expansión del sistema bajo los supuestos definidos, así como los costos asociados a emisiones de CO₂. En el gráfico 13 se muestra la generación por tecnología que se proyecta para el período 2009-2023 en los distintos escenarios.

GRÁFICO 13
RESULTADOS DEL PLAN INDICATIVO REGIONAL PARA LA GENERACIÓN EN TWh PARA EL PERÍODO 2010-2023



Fuente: CEAC, 2009, *Plan indicativo regional de expansión de la generación, período 2009-2023*, pág. 73.

Nota: Para la descripción de los casos, véase el cuadro 13 en la página 49.

El volumen de las emisiones equivalentes de CO₂ fue analizado de forma separada. Es decir, una vez que se tienen ya construidos los escenarios, se estima el costo asociado a las emisiones de contaminantes, que no es considerado en la optimización del sistema, pero permite tener una idea del costo externo no incorporado a la planeación. Para generar todas las plantas renovables se utilizó una tasa de emisión de 14 ton/GWh generado. En el caso de las turbinas y ciclos combinados alimentados con diésel se usó una de 650 ton/GWh, mientras que a los motores de media velocidad con búnker se les asignó 700 ton/GWh. Para las plantas de carbón se usó 1.100 ton/GWh, y para las plantas de ciclo combinado de gas natural licuado se supuso 420 ton/GWh (CEAC, 2009). Como se mencionó, se estimó el costo por tonelada de CO₂ en 20 dólares.

Para los planes, los costos estimados a valor presente fluctúan entre 25.000 y 30.000 millones de dólares de 2010. Los escenarios más económicos fueron el B y el H, es decir los que se refieren a la

generación sin restricciones, a la hidroeléctrica y a la promoción de energías renovables genéricas, en particular las que se refieren a pequeñas hidroeléctricas y la geotermia. Es por ello que la primera conclusión que emana del plan indicativo es que resulta estratégico que la subregión estimule estas energías. Otra conclusión relevante para el presente estudio es que la subregión requerirá introducir combustibles alternativos al petróleo, como el carbón o el gas natural, para operar las plantas grandes. Evidentemente esta última necesidad conllevaría impactos ambientales, particularmente si los precios de los combustibles son más bajos a lo esperado, pues esto incentivaría la inversión en plantas de carbón o petróleo, o si no existiera suficiente disponibilidad de gas natural.

Los costos externos por emisiones de GEI alcanzaron entre 3.737 millones de dólares en el caso G y 5.909 millones de dólares para el F. El primer caso se refiere a un escenario en el que se combina la promoción de las hidroeléctricas y los altos precios de los combustibles fósiles, mientras que el F describe el escenario en el que se tiene un mayor incremento de la demanda eléctrica.

A fin de incluir en dichas estimaciones del CEAC el costo de las externalidades de los contaminantes primarios y secundarios, mismos que generan los impactos locales y regionales descritos en este estudio, se pueden aplicar dos métodos. El primero es similar al realizado en el plan indicativo para estimar el impacto global de CO₂. En dicho método se estiman las emisiones para cada escenario al aplicar factores de emisión con base en la generación por tipo de tecnología. Una vez que se tienen las emisiones se multiplican por el costo externo de la tonelada del contaminante en cuestión. La estimación de externalidades del presente estudio arrojó un costo promedio para Centroamérica por tonelada de SO₂ de 154 dólares, de NO_x de 93 dólares y de PM₁₀ de 419 dólares. El total de toneladas se podría multiplicar por estos indicadores.

El segundo método es utilizar el costo normalizado de la externalidad en términos de dólares/kWh estimado para el conjunto de las plantas térmicas, y aplicarlo a las proyecciones de incremento de generación por combustibles fósiles.

El primer método requiere de un análisis detallado sobre la prospectiva de consumo de combustibles, de sus calidades (por ejemplo, propiedades tales como contenido de azufre, contenido de cenizas en el caso del carbón, entre otras), así como de las tecnologías de generación y de control de emisiones que se pretenda tener en las plantas. Una vez que se cuenta con información detallada, se pueden aplicar los factores de emisión para cada unidad y estimar como se hizo en este estudio las emisiones de contaminantes. El segundo método es más agregado, aunque permite dar una estimación general sobre el impacto. Se consideró conveniente presentar para todos los escenarios esta estimación y desglosar un escenario de interés para el caso de las externalidades con el primer método.

Es necesario precisar que ambos métodos de análisis de escenarios prospectivos son sólo una primera aproximación. Particularmente, es justo llamar la atención al hecho de utilizar la información de externalidades en el año base 2008 y utilizarla para estimar el impacto de forma prospectiva. En esta estimación, se considera que las demás variables del impacto se mantienen constantes y solamente se analiza el cambio en las emisiones de contaminantes resultante en los distintos escenarios del CEAC.

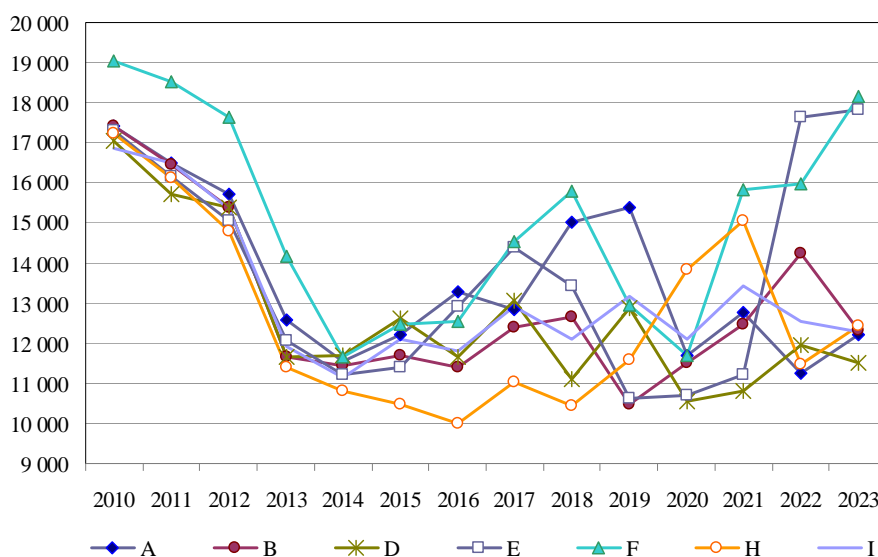
En realidad, es una estimación conservadora en el sentido de que la tendencia de las principales variables que afectan los costos externos crece en el período estudiado. Es razonable esperar, por ejemplo, que aumente el número de población y el ingreso per cápita, ambas variables críticas en el componente de costos externos. A pesar de estas limitaciones, la información permite contar con elementos cuantitativos sobre la magnitud del impacto esperado, y captura el impacto en las externalidades del incremento en las emisiones.

El esfuerzo de estimación prospectiva, a pesar de las limitaciones planteadas en el párrafo anterior, es comparable, por ejemplo, a usar un valor constante de 20 por tonelada de CO₂ para el período completo. En estricto sentido debiera calcularse el valor descontado del daño marginal de una tonelada, utilizando curvas de costo marginal y daño marginal en un modelo de valoración integrada o al menos curvas marginales de mitigación para todo el período. Sin embargo, asociar un valor de 20 es una primera aproximación para analizar el impacto de incorporar el costo externo del daño por GEI.

Para estimar las externalidades se consideró información detallada sobre la generación térmica a base de carbón, búnker y diésel, proveniente del plan indicativo del CEAC. Los datos de dicha generación provenientes de la información para cada escenario se presentan en el gráfico 14 (de la información sobre generación térmica, se seleccionó únicamente aquella proveniente de dichos combustibles). En estricto sentido debieran calcularse las emisiones de NO_x del gas natural, pero por el momento no se incluye este impacto, que es menor, a fin de ser consistente con las estimaciones de externalidades de este estudio.

Aunque se prevé que se puede aproximar a los resultados del escenario base (A), se precisa que no se modeló el escenario C por no contar con la información detallada.

GRÁFICO 14
GENERACIÓN A BASE DE CARBÓN, DIÉSEL O BÚNKER PARA LOS ESCENARIOS DEL PLAN
INDICATIVO POR AÑO PARA EL PERÍODO 2010-2023
(En GWH)

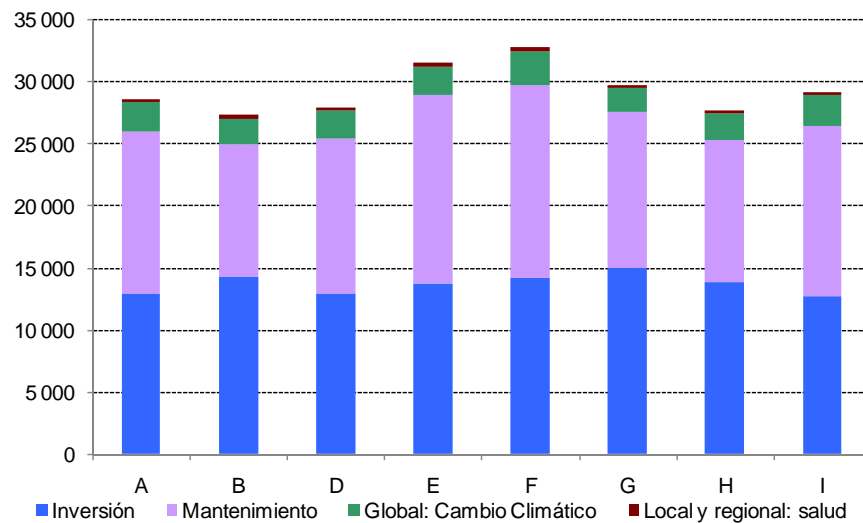


Fuente: Elaboración propia con base en datos del CEAC.

Nota: Para la descripción de los casos, véase el cuadro 13 en la página 49.

Los resultados de externalidades se obtuvieron considerando el costo estimado de 0,14 centavos por kWh para la generación térmica para los ocho escenarios del Plan Indicativo (véase el gráfico 15). Los costos se muestran en valor presente neto. Para el caso de las externalidades en salud se utiliza una tasa de descuento de 3%, que es la recomendación de los expertos en evaluación de políticas y salud pública para su aplicación a nivel internacional.

GRÁFICO 15
EXTERNALIDADES EN LOS DISTINTOS ESCENARIOS DEL PLAN INDICATIVO
(En millones de dólares en valor presente de enero 2010)



Fuente: Elaboración propia.

Nota: Para la descripción de los casos, véase el cuadro 13 en la página 49.

CUADRO 15
COSTOS DE GENERACIÓN CON Y SIN EXTERNALIDADES POR ESCENARIO
(En millones de dólares en valor presente de enero 2010)

Escenario	Costos de los planes		Externalidades		Costo sin externalidad	Costo con externalidad	% Ext.
	Inversión	Mantenimiento	Global: cambio climático	Local y regional: salud			
A	12 957	12 976	2 373	290	25 933	28 596	10,3
B	14 240	10 718	2 034	277	24 958	27 269	9,3
D	12 908	12 484	2 225	249	25 392	27 866	9,7
E	13 746	15 107	2 308	292	28 853	31 453	9,0
F	14 198	15 452	2 756	320	29 649	32 726	10,4
G	14 936	12 594	1 926	271	27 529	29 727	8,0
H	13 833	11 473	2 100	280	25 306	27 686	9,4
I	12 682	13 682	2 531	258	26 365	29 153	10,6

Fuente: Elaboración propia con base en datos del CEAC, 2009, y resultados del estudio.

Nota: Para la descripción de los casos, véase el cuadro 13 en la página 49.

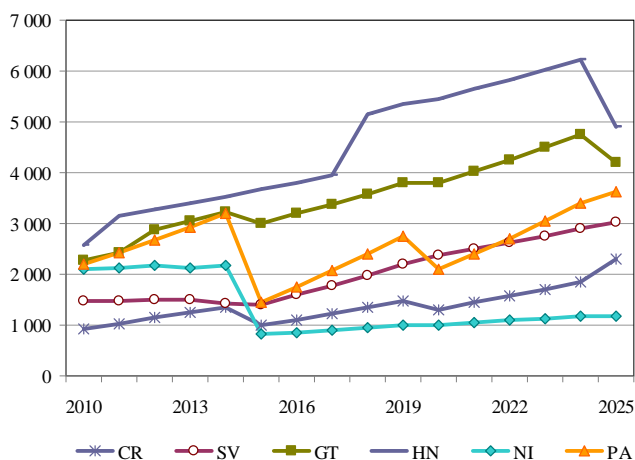
D. ANÁLISIS DETALLADO DE EXTERNALIDADES AMBIENTALES DEL ESCENARIO BASE DE LEAP

Al tomar en cuenta la información proporcionada por la CEPAL y la proveniente de modelaciones realizadas con el modelo LEAP²⁵ para la generación en Centroamérica para el período 2010-2025, se estimó de forma detallada para cada país las emisiones de SO₂, NO_x y PM₁₀ y se utilizaron las emisiones estimadas

²⁵ Long range Energy Alternatives Planning System, (<http://www.energycommunity.org/default.asp?action=47>).

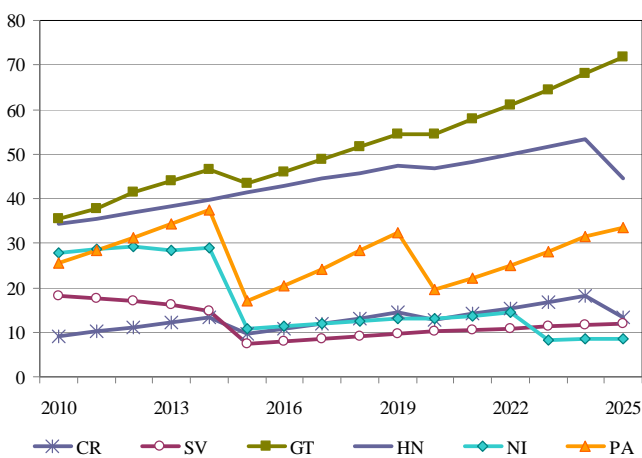
por dicho modelo de CO₂. En los gráficos 16, 17, 18 y 19 se muestran para cada país las emisiones de CO₂, SO₂, NO_x y partículas, respectivamente.

GRÁFICO 16
CENTROAMÉRICA: EMISIONES ESTIMADAS DE CO₂ PARA
EL PERÍODO 2010-2025, SUBSECTOR ELÉCTRICO
(En millones de toneladas de CO₂)



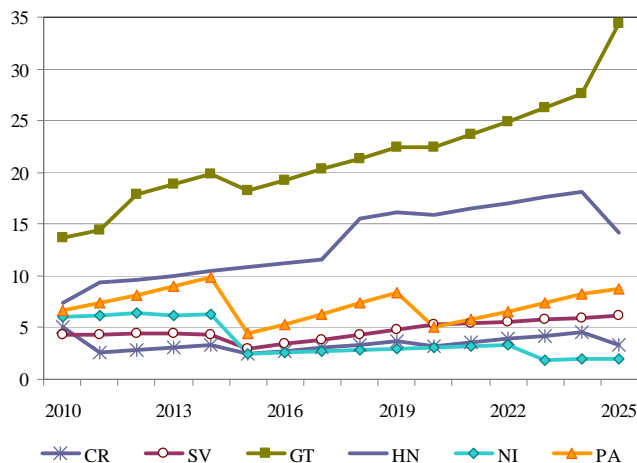
Fuente: Elaborado con base en información de la CEPAL generada en el modelo LEAP.

GRÁFICO 17
CENTROAMÉRICA: EMISIONES ESTIMADAS DE SO₂ PARA
EL PERÍODO 2010-2025, SUBSECTOR ELÉCTRICO
(En millones de toneladas de SO₂)



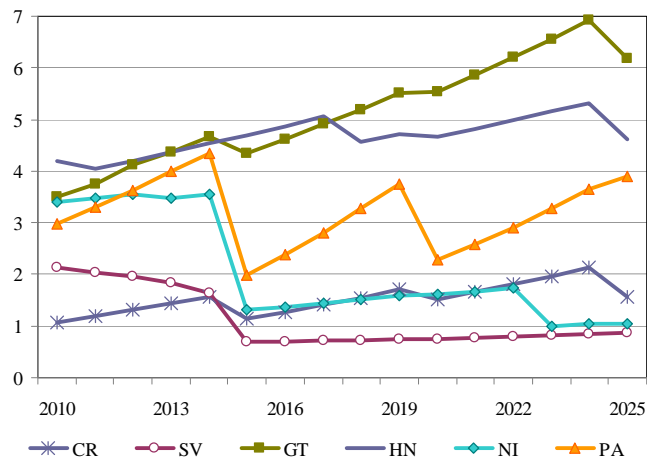
Fuente: Elaborado con base en información de la CEPAL del modelo LEAP y los factores de emisión del IPCC.

GRÁFICO 18
CENTROAMÉRICA: EMISIONES ESTIMADAS DE NO_x PARA
EL PERÍODO 2010-2025, SUBSECTOR ELÉCTRICO
(En millones de toneladas de NO_x)



Fuente: Elaborado con base en información de la CEPAL del modelo LEAP y los factores de emisión del IPCC.

GRÁFICO 19
CENTROAMÉRICA: EMISIONES ESTIMADAS DE PM₁₀ PARA
EL PERÍODO 2010-2025, SUBSECTOR ELÉCTRICO
(En millones de toneladas de PM₁₀)



Fuente: Elaborado con base en información de la CEPAL del modelo LEAP y los factores de emisión de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos.

Se consideró conveniente diferenciar para cada país el costo por tonelada para cada uno de los contaminantes emitidos, por lo que se estimó el costo promedio para la tonelada de SO₂, NO_x y PM₁₀, con la información del cuadro 12. Los resultados obtenidos se muestran en el cuadro 16. En todos los países se consideró la tonelada de CO₂ en 20 dólares, para mantener el supuesto hecho por el Plan Indicativo.

Con las emisiones proyectadas y los costos estimados se multiplicaron las toneladas por el costo asociado, como primera aproximación. En realidad, es una estimación conservadora en el sentido de que la tendencia de las principales variables que afectan los costos externos es creciente en el período estudiado. Es razonable esperar, por ejemplo, que aumente el número de población y el ingreso per cápita, ambas variables críticas en el componente de costos externos. Sin embargo, la información permite contar con elementos cuantitativos sobre la magnitud del impacto esperado y la captura del impacto en las externalidades del incremento en las emisiones.

CUADRO 16
CENTROAMÉRICA: COSTOS EXTERNOS POR TONELADA DE CONTAMINANTE
(En dólares por tonelada)

País	NO _x	SO ₂	PM ₁₀
Costa Rica	152	272	757
El Salvador	135	271	1216
Guatemala	94	187	306
Honduras	50	101	250
Nicaragua	44	87	207
Panamá	135	271	1 200

Fuente: Elaboración propia.

Para el período 2010-2025 las emisiones estimadas para Centroamérica alcanzarían 41 millones de toneladas de CO₂, 440.000 toneladas de SO₂, 115.000 toneladas de NO_x y 152 millones de partículas (véase el cuadro 18). En dicho cuadro se presentan para cada país de forma desglosada las externalidades asociadas a las emisiones de CO₂, SO₂, NO_x y partículas. Se estima que para el período estudiado se tendrá un costo externo anual promedio de 307,2 millones de dólares por externalidades asociadas al cambio climático, un promedio anual de 44,3 millones de dólares por externalidades asociadas a impactos en la salud.

El total de las externalidades en el escenario base se estimó en el orden de 5.623 millones de dólares. El valor presente neto de las externalidades se calculó utilizando una tasa de descuento de 12% para emisiones de cambio climático (como se supone en el plan estratégico), y de 3% para efectos en la salud. El valor presente neto con estos supuestos de las externalidades es de 3.265 millones de dólares, cuyo 70% corresponde al impacto de los GEI y 30% al impacto en la salud (véase el cuadro 17).

CUADRO 17
VALOR PRESENTE NETO DE LOS COSTOS EXTERNOS
PARA EL ESCENARIO LEAP, 2010
(En millones de dólares)

VPN Impacto por cambio climático	2284,55	70%
VPN Impacto en salud	980,89	30%
Total VPN	3265,44	100%

Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 18
CENTROAMÉRICA: ANÁLISIS DETALLADO DE COSTOS EXTERNOS DEL ESCENARIO LEAP, 2010-2025
(En millones de dólares)

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	Total
CO2																	
Costa Rica	18,70	20,72	22,80	24,86	27,17	19,83	22,19	24,54	26,84	29,61	26,21	28,84	31,48	34,21	37,04	46,13	441,19
El Salvador	29,72	29,73	29,93	29,84	28,31	28,20	31,79	35,58	39,56	43,78	47,74	50,17	52,59	55,11	57,77	60,58	650,40
Guatemala	45,43	48,47	57,44	60,97	64,67	60,12	63,86	67,72	71,66	75,79	76,01	80,49	85,05	89,81	94,80	83,90	1126,19
Honduras	51,39	63,12	65,54	68,06	70,67	73,28	76,01	78,84	103,22	106,84	109,21	112,85	116,64	120,58	124,51	97,77	1438,56
Nicaragua	41,81	42,74	43,65	42,59	43,49	16,40	17,21	18,06	18,94	19,79	20,08	20,97	21,87	22,40	23,74	23,35	437,09
Panamá	43,84	48,48	53,42	58,68	64,00	29,17	34,91	41,28	48,09	54,95	42,13	47,93	54,01	60,76	67,82	72,33	821,81
ICA	230,89	253,27	272,79	285,00	298,31	227,00	245,98	266,02	308,32	330,75	321,40	341,24	361,64	382,87	405,69	384,06	4915,23
SO2																	
Costa Rica	2,49	2,76	3,03	3,31	3,61	2,64	2,95	3,26	3,57	3,94	3,49	3,84	4,19	4,55	4,93	3,62	56,18
El Salvador	4,92	4,76	4,61	4,41	4,02	2,01	2,16	2,31	2,47	2,63	2,75	2,85	2,94	3,04	3,14	3,25	52,24
Guatemala	6,65	7,08	7,77	8,24	8,73	8,11	8,61	9,13	9,65	10,20	10,23	10,83	11,44	12,07	12,74	13,44	154,94
Honduras	3,46	3,58	3,71	3,86	4,00	4,15	4,31	4,47	4,59	4,75	4,70	4,86	5,02	5,19	5,36	4,48	70,50
Nicaragua	2,43	2,49	2,54	2,48	2,53	0,94	0,98	1,03	1,08	1,13	1,15	1,20	1,25	0,71	0,75	0,74	23,42
Panamá	6,96	7,70	8,48	9,31	10,16	4,64	5,56	6,57	7,65	8,74	5,30	6,03	6,80	7,65	8,53	9,10	119,18
ICA	26,91	28,36	30,14	31,61	33,06	22,49	24,57	26,77	29,02	31,41	27,62	29,60	31,63	33,21	35,45	34,63	476,46
NOx																	
Costa Rica	0,77	0,39	0,43	0,47	0,51	0,37	0,42	0,46	0,50	0,56	0,49	0,54	0,59	0,64	0,69	0,51	8,34
El Salvador	0,59	0,59	0,60	0,60	0,58	0,41	0,46	0,52	0,58	0,65	0,71	0,73	0,76	0,78	0,80	0,83	10,19
Guatemala	1,28	1,35	1,68	1,76	1,85	1,71	1,80	1,90	2,00	2,10	2,10	2,22	2,33	2,45	2,58	3,22	32,33
Honduras	0,37	0,47	0,49	0,50	0,52	0,54	0,56	0,58	0,78	0,81	0,80	0,83	0,85	0,88	0,91	0,71	10,62
Nicaragua	0,27	0,27	0,28	0,27	0,28	0,11	0,11	0,12	0,13	0,13	0,13	0,14	0,14	0,08	0,09	0,09	2,63
Panamá	0,91	1,00	1,11	1,22	1,33	0,60	0,72	0,85	0,99	1,14	0,69	0,78	0,88	0,99	1,11	1,18	15,52
ICA	4,18	4,07	4,57	4,82	5,06	3,74	4,08	4,44	4,99	5,39	4,92	5,24	5,56	5,83	6,18	6,54	79,64
PM10																	
Costa Rica	0,81	0,90	0,99	1,08	1,18	0,86	0,97	1,07	1,17	1,29	1,14	1,25	1,37	1,49	1,61	1,18	18,37
El Salvador	2,61	2,49	2,38	2,24	2,00	0,84	0,86	0,87	0,89	0,91	0,89	0,93	0,96	0,99	1,02	1,06	21,93
Guatemala	1,07	1,14	1,26	1,34	1,43	1,33	1,41	1,50	1,59	1,69	1,69	1,79	1,90	2,01	2,12	1,89	25,16
Honduras	1,05	1,01	1,05	1,09	1,13	1,17	1,22	1,26	1,14	1,18	1,17	1,20	1,24	1,29	1,33	1,15	18,68
Nicaragua	0,70	0,72	0,74	0,72	0,73	0,27	0,28	0,30	0,31	0,33	0,33	0,35	0,36	0,20	0,22	0,21	6,78
Panamá	3,57	3,95	4,35	4,78	5,22	2,39	2,86	3,38	3,93	4,49	2,73	3,10	3,49	3,93	4,39	4,68	61,24
ICA	9,82	10,22	10,77	11,25	11,69	6,86	7,59	8,38	9,03	9,88	7,95	8,63	9,33	9,91	10,69	10,18	152,17
Externalidades ICA	271,81	295,91	318,28	332,68	348,12	260,09	282,22	305,61	351,36	377,42	361,89	384,71	408,16	431,82	458,01	435,41	5623,49
Externalidad CC	230,89	253,27	272,79	285,00	298,31	227,00	245,98	266,02	308,32	330,75	321,40	341,24	361,64	382,87	405,69	384,06	4915,23
Externalidades salud	40,92	42,65	45,48	47,68	49,81	33,09	36,24	39,59	43,04	46,67	40,49	43,47	46,52	48,94	52,32	51,35	708,26

Fuente: Elaboración propia.

En los resultados se muestra que es necesario realizar el análisis detallado de todos los escenarios a fin de estimar las emisiones correspondientes a cada una de las tecnologías, pues el estimado agregado en centavos de dólar por kWh para la generación térmica subestimó el impacto en los demás escenarios. Ello se debe a que el estimado de 0,14 centavos de dólar/kWh corresponde al conjunto de tecnologías. Las diferencias también podrían atribuirse a distintos supuestos en la modelación del escenario realizada por el CEAC y la realizada con el modelo LEAP, que resultase en una distinta mezcla de tecnologías y por lo tanto un mayor uso de combustibles fósiles, particularmente de carbón y búnker en el escenario LEAP. El análisis presentado puede considerarse un estimado conservador del daño.

E. MECANISMOS PARA LA INTERNALIZACIÓN DE LOS COSTOS AMBIENTALES

Los mecanismos de internalización de los costos ambientales externos comprenden la regulación directa y los instrumentos económicos. Dentro de la primera se incluyen las normas técnicas sobre límites de emisión y las especificaciones sobre la calidad ambiental de los combustibles. Dichos mecanismos establecen las tecnologías permitidas y/o requieren la instalación de tecnologías de control. Por otra parte, los instrumentos económicos contienen los impuestos ambientales y los mercados de emisiones.

Hasta este momento no existen normas homogéneas subregionales sobre límites de emisión o criterios de calidad ecológica de los combustibles. El Banco Mundial y organismos como el BID y la Corporación Financiera Internacional establecen requerimientos ambientales para los proyectos que financian, por lo que se espera que esta buena práctica se reproduzca en la subregión y se armonicen los criterios ambientales, al mismo tiempo que se atiendan a los costos externos de las emisiones contaminantes.

En el caso del uso de combustibles en Centroamérica, prevalece el uso de dos tipos de búnker, uno de alto contenido de azufre (~3%) y otro de bajo (~1%). Estos combustibles se utilizan primordialmente en Honduras y Nicaragua, donde el uso de dichos combustibles es muy importante. En el caso del diésel empleado en turbinas de gas, el contenido de azufre se encuentra en el orden de 1%. Para el caso del carbón utilizado en Guatemala, los contenidos alcanzan cerca de 0,7%.

Por medio de normas técnicas sobre las especificaciones de los combustibles, las emisiones de SO₂ se pueden regular con relativa facilidad. Por ejemplo, establecer zonas donde únicamente se utilicen combustibles de un contenido máximo de 1% de azufre²⁶ repercutiría en una reducción inmediata de más de 66% de las emisiones, comparado con un escenario en el que se emplea el búnker de alto contenido de azufre. De igual forma, al disminuir el contenido de azufre permitido en el diésel o el carbón, se reducen proporcionalmente las emisiones de compuestos de azufre.

Evidentemente, aunque este mecanismo de internalización resulta atractivo para el regulador, los costos de cumplimiento involucrados pueden ser altos. Dichos costos incluyen no solamente los costos asociados al diferencial de precio por una calidad superior de los combustibles, sino también los asociados a la pérdida de la flexibilidad del sector y el país para decidir sobre los combustibles que compra, refina o importa, lo que puede resultar para algunos países de una relevancia estratégica.

Como se explica en este apartado, el criterio de eficiencia económica permite balancear costos y beneficios ambientales para lograr un desarrollo sustentable del sector.

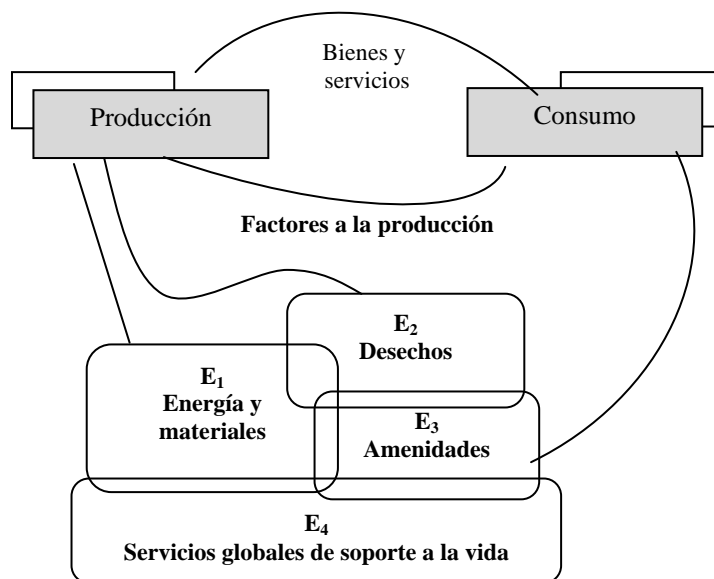
²⁶ O en su caso, mezclas de combustibles que de forma ponderada, resulten en dicho contenido máximo. Un ejemplo de este tipo de regulaciones es la Norma Oficial Mexicana NOM-SEMARNAT-085-1994 sobre límites permisibles de emisión (http://www.semarnat.gob.mx/leyesy normas/Normas%20Oficiales%20Mexicanas%20vigentes/MIDIF_NOM_085.pdf).

1. Avances en la regulación ambiental para internalizar externalidades

La regulación ambiental busca incentivar el desarrollo sustentable de los sectores productivos, es decir, su objetivo es sentar un marco regulatorio y de incentivos para fomentar el crecimiento económico y el bienestar social en armonía con el medio ambiente. Asimismo, se intenta minimizar los efectos negativos sobre el medio ambiente que puedan representar las actividades económicas y fomentar los sectores al considerar el costo económico y ambiental que pueden generar sobre otros sectores.

A fin de presentar los mecanismos existentes para internalizar los costos ambientales, es conveniente recordar algunos conceptos básicos con el fin de contextualizar la discusión. Aunque los factores de la producción incorporan elementos como el uso de la energía y materiales como materias primas, no es común que en sus decisiones cotidianas los productores o los consumidores consideren el costo asociado al impacto ambiental de los desechos, el daño al medio ambiente y las amenidades²⁷ y servicios que el mismo provee, y en una forma más amplia, los sistemas que soportan la vida como el agua, el aire y el suelo. Se dice que dichos costos están fuera del mercado dado que no forman tradicionalmente parte del sistema de precios de la economía.

GRÁFICO 20
INTERACCIONES ENTRE LA ECONOMÍA Y EL MEDIO AMBIENTE



Fuente: Elaboración propia.

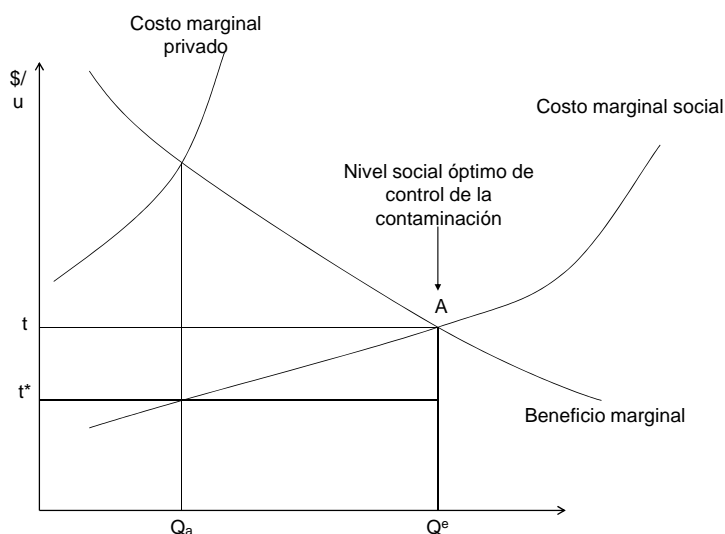
En este contexto, la regulación ambiental trata de incorporar en un sentido amplio el concepto de “internalización de externalidades ambientales” para encontrar niveles de control eficientes, así como utilizar nuevos instrumentos que, en colaboración con el marco legal o modificándolo, puedan brindar soluciones efectivas para la protección ambiental. Constituyen efectos externos —o externalidades—, todos aquellos costos que al no ser considerados en el sistema de precios, afectan a la sociedad y su bienestar colectivo, ya sea porque generan un efecto económico indeseable (por ejemplo daños a la salud

²⁷ Las amenidades son valores que provee el medio ambiente, como la visibilidad, los paisajes, la biodiversidad y otros servicios recreacionales, que generalmente no son intercambiados en los mercados y se consumen como bienes públicos. Los problemas de contaminación reducen el bienestar social al disminuir la calidad ambiental de estas amenidades y generar una pérdida a los “consumidores”, que en ausencia de la contaminación disfrutarían del paisaje y la oportunidad de poder disfrutar de la naturaleza.

humana o en las cosechas, entre otros) o por afectar los ecosistemas (como la contaminación de los mantos freáticos y de la capacidad de los recursos, por ejemplo usar los recursos naturales, tanto de la presente como de las generaciones futuras).

Conceptualmente existe un problema de externalidades cuando el costo social de las actividades económicas difiere del costo privado. En economía ambiental se considera que existe un nivel de control de la contaminación eficiente, en el que el costo marginal de abatimiento es igual al beneficio marginal social de disminuir la contaminación.

GRÁFICO 21
EFICIENCIA ECONÓMICA



Fuente: Elaboración propia.

Nota: El eje de las ordenadas representa el costo de controlar la contaminación de “u” unidades del proceso en cuestión (por ejemplo: dólares/kWh en el caso de la producción termoeléctrica, o bien dólares/m³ en el caso de contaminación de un río o cuerpo de agua). El eje de las abscisas representa la cantidad de unidades del proceso en las que se toman medidas de control de contaminación. Las primeras unidades a contralrar tienen costos marginales (privados y sociales) más bajos y beneficios marginales más altos.

En una primera etapa, en la regulación ambiental se establecieron controles para disminuir el impacto de las actividades humanas sobre el medio ambiente. A esta primera etapa se le ha denominado comúnmente en la literatura sistemas de “comando y control”, pues se instaura una normatividad que todos los contaminadores deben cumplir y el sector público debe controlar. Por lo general, este tipo de regulación instituye un “estándar” o límite de emisión para todas las empresas o prestadores de servicios en un sector, sin considerar el efecto marginal de los daños y beneficios.

Es evidente que contar con criterios claros y uniformes conlleva beneficios tanto para las comunidades aledañas a las zonas afectadas, y el medio ambiente en general, como para el sector industrial regulado. Normas técnicas estandarizadas permiten, por ejemplo, evitar problemas asociados a temas de competitividad (las empresas prefieren instalarse en lugares con criterios ambientales más

laxos²⁸). Es por ello que en la mayoría de los países, un primer paso para regular las emisiones del sector eléctrico ha sido establecer límites máximos permisibles de emisión de contaminantes (conocidos como regulaciones de “cantidad”, en contraste con las regulaciones de “precio”, como los impuestos ambientales). Dichos límites han tenido en cuenta el estado de la tecnología y otras consideraciones económicas sobre el desarrollo del sector energía que se regula, como la disponibilidad de combustibles más limpios. Las normas técnicas permiten brindar “estándares mínimos de control” para la protección ambiental, los que garantizan un nivel de protección a la salud, a la sociedad y a los ecosistemas.

Sin embargo, normalizar procesos económicos conlleva diversos costos. Las nuevas tendencias de regulación ambiental tratan de incorporar al criterio de minimización de “efectos negativos” sobre el medio ambiente los resultados del análisis costo-beneficio, el criterio de “costo-efectividad” y el marco de referencia de manejo de riesgos (al incorporar los riesgos ambientales y económicos, así como la existencia de incertidumbre en la información). Los instrumentos económicos de política ambiental surgen como un complemento necesario a los instrumentos de comando y control (como las normas técnicas sobre límites de emisión) a fin de crear sinergias que permitan canalizar recursos a las actividades que reportan el mayor beneficio social y ambiental. En general, los incentivos económicos se consideran más adecuados, por ejemplo, para la innovación tecnológica²⁹ y para brindar mayor “flexibilidad” a los sectores regulados. Generalmente, dicha flexibilidad se refiere a permitir distintas estrategias para reducir costos, siempre considerando una meta ambiental global.

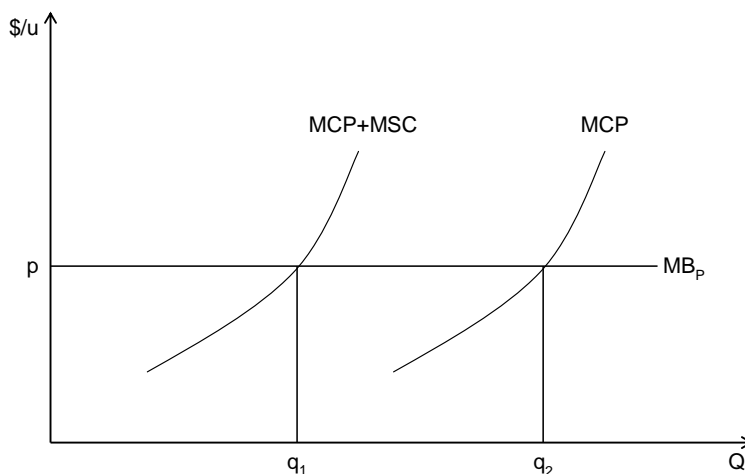
El enfoque regulatorio de “comando y control” conlleva costos que no necesariamente son los mínimos para controlar la contaminación, dado que algunas empresas o prestadores de servicios son más eficientes y pueden lograr niveles de contaminación más ambiciosos a menor costo. Las empresas en un mismo sector económico pueden enfrentar distintas curvas de costo marginal. En este caso, es necesario establecer una normatividad que permita reducir la contaminación al menor costo posible para que los beneficios sean mayores con el fin de asegurar la protección ambiental y la salud. Asimismo, no todos los impactos ambientales son iguales en el territorio. Por ejemplo, si la sociedad en su conjunto asigna un valor alto a proteger la calidad del aire adyacente a centros de población (en ciudades densamente pobladas) o comunidades biológicas específicas (en zonas de alta biodiversidad), la regulación ambiental claramente reportará mayores beneficios si es más estricta cerca de las zonas donde el daño ambiental es mayor.

Los nuevos enfoques regulatorios, sin descartar la necesidad de especificaciones técnicas en algunos procesos, centran su atención en los mecanismos de mercado. Estos tienen por objeto incorporar las externalidades ambientales en la toma de decisiones y permiten balancear costos y beneficios marginales. Los instrumentos de mercado incentivan a las empresas y a los individuos a disminuir la contaminación al incorporar el valor económico de los daños de su actividad. Ya sea que la empresa se vea obligada a pagar por sus afectaciones en proporción directa a su impacto (cada unidad marginal), o porque puede “beneficiarse” de reducciones mayores a las que tiene permitido emitir, los incentivos de mercado tienen el potencial de brindar esquemas regulatorios costo-eficientes. De esta forma, la meta ambiental se logra al menor costo social posible, se generan incentivos para la innovación, tanto tecnológica como de proceso, y se obtienen los mayores beneficios para la sociedad y el medio ambiente.

²⁸ Sin embargo, es importante no olvidar que la variable sobre costos de cumplimiento ambiental es sólo uno de los aspectos considerados, por lo que no necesariamente decide la ubicación de las centrales. Sin embargo, en un mercado integrado es importante no olvidar esta variable.

²⁹ Ante un mismo estándar, las empresas tienen menos razones para avanzar más allá de lo que la autoridad ambiental determine. Se considera que las regulaciones de precio, al imponer un costo económico por cada tonelada, de emisión constituyen un mejor incentivo para buscar nuevas formas de reducción de emisiones.

GRÁFICO 22
CRITERIO COSTO-EFECTIVIDAD



Fuente: Elaboración propia.

Nota: Para los ejes aplican los mismos comentarios que los del gráfico 21. En el gráfico la línea horizontal MB_p representa los beneficios marginales para un costo "p", MCP el costo marginal privado y MSC el costo marginal social. Debido a que los costos de control difieren usualmente entre las empresas y regiones del país, un estándar de control no necesariamente conlleva a un resultado costo-eficiente ni a la mejor relación costo-beneficio ambiental.

Tradicionalmente los instrumentos económicos más utilizados para la internalización de externalidades son los impuestos de tipo *pigouviano*³⁰, que establecen un impuesto igual al costo marginal externo (CMP+impuesto=CMS). Se busca internalizar dicho costo en las decisiones de mercado, al forzar a los agentes a aumentar su propio nivel de control de la contaminación³¹. Los instrumentos se conocen como regulaciones de "precio", pues tratan de asociar un costo directo a la emisión de contaminantes.

Los impuestos ambientales han sido puestos en marcha ampliamente en la Unión Europea, a tal grado que la OCDE estima que representan alrededor de 3% del PNB de la UE (Millock y otros, s/f). Evidentemente, determinar el impuesto óptimo es complejo por la naturaleza misma de los costos externos, además, el proceso político incrementa la dificultad de establecer estos impuestos. El resultado en la Unión Europea es que los impuestos ambientales a los contaminantes tienen un amplio margen de variación entre los distintos países. Por ejemplo, los países nórdicos (Suecia, Noruega y Dinamarca) tienen un impuesto a las emisiones de SO_2 de aproximadamente 1.300 euros/ton en Dinamarca y 1.600 en Suecia, mientras que en Italia, Francia, Suiza y España el impuesto a las emisiones de SO_2 es de menos de 50 euros por tonelada (Millock y otros, s/f).

Se precisa que los impuestos ambientales no necesariamente implican una carga para el sector regulado en su conjunto, o para la sociedad. Se pueden diseñar los sistemas de impuestos ambientales de

³⁰ Se denomina impuesto *pigouviano* por el economista Arthur Pigou, el primero en exponer el problema de las externalidades y que propuso dicho mecanismo de internalización.

³¹ Producido con la contaminación, por ejemplo, a la electricidad. Esta variante es generalmente más adecuada, pues tasa y que evidencia al "mal" público.

tal manera que sean neutros en términos recaudatorios. Por ejemplo, en Suecia se cuenta con la experiencia de los impuestos a las emisiones de NO_x, donde se instrumentó un proceso de “reciclaje de ingresos fiscales dentro del sector” (Millock y otros, s/f). El sistema permitía tasar las emisiones, pero todos los ingresos fiscales se devolvían al sector eléctrico al considerar el consumo de combustibles y la eficiencia de las plantas. Por su parte, Francia cuenta también con un sistema similar que recicla el ingreso proveniente de los impuestos a las emisiones contaminantes mediante un subsidio para instalar tecnologías de control de emisiones.

El otro mecanismo, de más reciente implementación en el mundo, son los mercados de emisiones que permiten su intercambio, reguladas por medio de permisos de emisión transferibles. La utilización de los permisos de emisión transferibles predetermina la cantidad máxima permisible de emisiones agregadas, y deja en manos del mercado creado la posibilidad de fijar los costos del control de la contaminación. Los mercados de emisiones permiten a las empresas cumplir con sus metas de reducción de una forma efectiva cuando existen diferentes costos marginales de mitigación entre las empresas que deciden participar en el comercio.

El principio fundamental es que debe cumplirse un objetivo ambiental fijado por la autoridad, y se debe brindar flexibilidad a las empresas para que decidan cuáles serán sus estrategias de reducción. Una empresa con costos de reducción altos puede, por ejemplo, decidir comprar reducciones de otra empresa que haya decidido superar su nivel obligatorio con el objetivo de vender sus emisiones, y con ello lograr disminuciones de menor costo, con el mismo beneficio ambiental.

Un ejemplo notable de este instrumento es el mercado de emisiones de SO₂ que funciona en los Estados Unidos desde 1991, conocido como el sistema *cap and trade*³² o *límite total y comercio*. En éste existe un límite global de emisiones que todas las empresas eléctricas tienen que cumplir en su conjunto, con la posibilidad de intercambiar sus emisiones de forma que las empresas con menores costos de reducción mitiguen la contaminación al máximo. Se considera que este sistema ha permitido a los Estados Unidos reducir las emisiones de SO₂ en más de 22% (7,3 millones de toneladas), al mismo tiempo que incrementar la producción de electricidad en más de 40% y reducir el conjunto de los costos de cumplimiento para las empresas. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos estimaba que disminuir emisiones a dicho nivel implicaría para el país costos del orden de 6 billones de dólares al año; sin embargo, con el mecanismo de mercado se estima que el costo ha sido de entre 1,1 y 1,8 billones de dólares, 20% o 30% del total estimado (Napolitano y otros, 2007). Con base en esta experiencia, en los Estados Unidos se han creado mercados regionales para NO_x y para prevenir la formación de ozono.

El uso de instrumentos económicos para apoyar el cumplimiento de las políticas ambientales está cada vez más difundido a escala mundial. A nivel internacional, el comercio de emisiones se ha incluido en el Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de Cambio Climático para mitigar las emisiones de CO₂ y otros GEI. Mediante estos instrumentos internacionales se han diseñado los procedimientos que deberán seguir los países para poder comerciar emisiones, ya sea a nivel de países desarrollados (con metas de reducción) o por medio del Mecanismo de Desarrollo Limpio (países desarrollados con países en desarrollo). Los mecanismos flexibles de la convención consideran los mecanismos económicos para internalizar las externalidades ambientales generadas por las emisiones de GEI debido a que tienen la capacidad de reducir los costos de mitigación a nivel global y así obtener el objetivo último de protección ambiental.

³² Se conoce como *cap&trade* a los sistemas de permisos de emisión transferibles que contemplan un techo máximo de emisiones totales, asignan permisos de emisión a determinadas fuentes, y permiten el libre comercio de las mismas entre las fuentes de emisión participantes. Existen otros sistemas de comercio de emisiones que no tienen límite predefinido.

La regulación ambiental que se establezca para el Mercado Eléctrico Centroamericano puede considerar una mezcla de mecanismos, establecer normas técnicas necesarias para todas las empresas que suministran a la red y también implementar instrumentos económicos, ya sea impuestos ambientales con el mecanismo de reciclado de los ingresos fiscales (a fin de no encarecer el costo global de la generación) y/o comercio de emisiones. Para revisar qué mecanismos son más convenientes para la subregión, se necesitan estudios específicos, en particular algunos sobre las curvas de costo marginal de reducción de emisiones para los distintos contaminantes. Asimismo, se requiere revisar las regulaciones nacionales y los instrumentos existentes de control y reporte de emisiones a fin de analizar la factibilidad de instrumentos regionales.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A. CONCLUSIONES

El año 2008 se utilizó como base para estimar las externalidades ambientales en los países centroamericanos que participan en el Mercado Eléctrico Regional y se aplicó la Metodología Vías de Impacto y el Modelo SIMPACTS del OIEA. Se seleccionaron con dicho fin las 25 centrales térmicas que aportan más del 90% de la generación térmica de Centroamérica.

Las externalidades de las centrales termoeléctricas seleccionadas se estimaron en 20,3 millones de dólares anuales. Este costo se circunscribe al impacto en la salud de la población afectada por las emisiones de dichas plantas generadoras. Este monto equivale a 0,02% del PIB de los países en el año de referencia. Las centrales identificadas como H1, P1, P2, y ES1 presentaron las mayores externalidades y cada una superó los 1,5 millones de dólares. Se precisa que estas externalidades son menores que las estimadas en países desarrollados, debido a la voluntad restringida para pagar los daños ambientales por el ingreso de los países y también porque las emisiones son menores que en otros países.

Se encontró que las emisiones de SO₂ arrojan los mayores costos externos (59% del total), seguidos de las partículas (29%) y los NO_x (12%). La internalización de las externalidades en el precio de la electricidad implicaría aumentos de entre 09 y 27 centavos de dólar por kWh, es decir, entre 1,83% y 5,35% del costo del kWh, si se considera un costo de referencia de 5 centavos de dólar por kWh. El costo externo ponderado, en función de la generación de las 25 centrales de producción, sería de 14 centavos de dólar por kWh.

Si se incluye el impacto del cambio climático calculado indirectamente mediante un precio de referencia de 20 dólares por tonelada de CO₂, el costo de las externalidades subiría entre 0,87 y 2,32 centavos de dólar por kWh. El promedio ponderado por la generación de las centrales analizadas, al considerar los impactos locales y regionales por contaminantes primarios y secundarios y el impacto por GEI, es de 1,57 centavos de dólar por kWh.

Los resultados deben interpretarse tomando en cuenta el rango de incertidumbre considerado en el modelo, lo que implica que el valor real podría ser de tres a cinco veces menor o mayor que el valor estimado. Este rango se calculó con una desviación estándar para cada efecto (morbilidad y mortalidad).

Para utilizar estos resultados se realizó una evaluación de los escenarios de expansión de la industria eléctrica utilizados en la *Estrategia 2020*. Dichos escenarios fueron tomados de los estudios del Plan Indicativo Regional de Centroamérica, realizados entre 2006 y 2007 por el CEAC. Como dichos estudios fueron recientemente actualizados (CEAC, 2009), se utilizó la última versión disponible que incluye datos de 2008. Se encontró que las externalidades ambientales incrementan el costo de los planes de generación entre 8% y 10,6% del total, considerando los impactos globales del cambio climático y los locales y regionales en la salud.

Además, se realizó un análisis detallado de las externalidades en el escenario base con información proveniente del modelo LEAP para el período 2010-2023. Se estimó que se tendrá un costo externo anual promedio de 307,2 millones de dólares por externalidades asociadas al cambio climático y 44,3 millones de dólares promedio anual por las vinculadas a impactos en la salud. Ello si no se realizan acciones para internalizar las externalidades y disminuir el impacto ambiental.

B. RECOMENDACIONES

Como conclusión de este estudio se pueden establecer las siguientes recomendaciones para la inclusión progresiva de las externalidades referidas dentro del MER, según lo comprobado en experiencias y compromisos internacionales.

a) Incluir en la evaluación de escenarios del CEAC un escenario adicional, en el que la selección de tecnologías se hace al internalizar las externalidades en el precio de los costos. Por ejemplo, podría considerarse como referencia el valor de 1,57 centavos de dólar/kWh adicional en la generación a base de combustibles fósiles. Hasta este momento se han considerado como costos separados en el análisis de la prospectiva; es decir, una vez que se han seleccionado las tecnologías, se evaluó el costo externo. Sin embargo, un primer paso para gradualmente diseñar políticas que permitan internalizar el costo ambiental es considerar, desde los ejercicios de planeación, un escenario en el que la selección de la tecnología cambie al considerar el costo ambiental. Las tecnologías seleccionadas en los modelos de optimización pueden cambiar si se considera el costo externo desde la optimización del modelo. Este proceso debe ser gradual y no implica que dicho escenario es el que debe seguirse de forma automática, pero permitirá brindar más elementos sobre los diferenciales en costos para internalizar los impactos ambientales.

b) Debido al impacto de las emisiones de GEI, el subsector electricidad es un candidato ideal para que los países de la subregión presenten propuestas de MDL sectoriales o programáticos para reducir emisiones que puedan obtener créditos a nivel internacional. Las reducciones en el impacto a la salud estimadas en este estudio constituyen beneficios que permiten visualizar una política integral con apoyo internacional para financiar el componente de “beneficio global” de la mitigación con altos beneficios locales y regionales. Con el apoyo generado por el pago asociado a los bonos de carbono, se podría detonar un proceso de transferencia tecnológica para generar electricidad a base de energías renovables. Ello le permitiría a la subregión participar con el cumplimiento de los compromisos internacionales de las negociaciones de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático, y presentar propuestas de acciones de mitigación apropiadas para los países.

c) El mecanismo de la regulación directa de los impactos es el más evidente. Tradicionalmente, los países han establecido normas de límites de emisión y, más recientemente, en diversos países se ha tratado de implementar instrumentos económicos a fin de internalizar estos costos externos. En particular, se encuentran como mecanismos económicos los impuestos ambientales a las emisiones, los mercados de emisiones y/o alternativas híbridas de ambos instrumentos.

d) En el documento del CEAC se identifica que dado el incremento esperado en las centrales térmicas, particularmente a base de carbón, será necesario que antes de introducir grandes centrales subregionales de carbón se desarrollen normativas ambientales estrictas y comunes en cada país. Sin embargo, como se presentan en este estudio los impactos de las emisiones de SO₂, NO_x y PM₁₀, dependen directamente del lugar y las condiciones en que se emiten. Como las centrales más cercanas a los centros urbanos tienen emisiones mucho más dañinas, las normas homogéneas no resolverían esto de manera adecuada. Es por ello que se recomienda considerar la necesidad de diferenciar la regulación, atendiendo el impacto georreferenciado de las emisiones. En términos económicos, el costo marginal de mitigación debe uniformarse con el beneficio marginal de reducir emisiones.

e) Se recomienda desarrollar guías y normativas que permitan modelar de forma más detallada los impactos, a fin de establecer límites que permitan proteger en mayor grado las zonas más sensibles, y que no encarezcan de forma innecesaria el sistema de generación. Para ello se requiere

aplicar modelos de dispersión detallados, con objeto de poder modelar el impacto en la formación de ozono que no fue posible evaluar en la metodología simplificada, así como definir normas de emisión por cuenca ambiental.

f) Los instrumentos económicos se presentan como mecanismos idóneos para mercados regionales, pese a requerir un ente regulador suficientemente fuerte para que los incentivos económicos sean efectivos. Por ejemplo, si se buscara incentivar la reducción de emisiones por medio de impuestos a las toneladas de emisión de contaminantes, se necesitaría en este caso de una agencia que pueda cobrar dichos impuestos o de arreglos interinstitucionales entre los países. Se precisa que no necesariamente estos impuestos encarecerían la electricidad, ya que el mecanismo económico podría diseñarse de tal forma que se volviera neutro (reciclado de los ingresos de este impuesto con base en la eficiencia de las plantas). Se recomienda realizar un estudio más detallado de las posibles opciones de combinaciones de impuestos y mecanismos de comercio de emisiones factibles para la subregión.

g) Se identificó que para mejorar la aplicación de esta metodología en Centroamérica, se requiere sistematizar la información existente en la subregión y resolver puntos clave, como información escasa o inexistente, necesidad de nuevas formas de recopilar información rutinaria, o de realizar mediciones de contaminantes en lugares presumiblemente críticos, entre otros. En este estudio se utilizó información de referencia de países en desarrollo, particularmente de México, y la metodología simplificada de la Unión Europea por medio del modelo SIMPACTS.

Como se señala en la *Estrategia 2020*, Centroamérica cuenta con un alto potencial de recursos hidroeléctricos y geotérmicos, aprovechados tan sólo en 17% y 15%, respectivamente. Situación similar se tiene con los recursos solar y eólico, que están prácticamente sin explotar. Los mecanismos recomendados permitirían fomentar una competencia más justa entre las distintas fuentes de energía a fin de cumplir con los objetivos de desarrollo sustentable en la subregión.

BIBLIOGRAFÍA

- Banco Mundial (2009), *World Economic Indicators* (<http://www.worldbank.org/data/>).
- Brunekreef, B. y G. Hoek (1993), *The Relationship between Low-level Air Pollution Exposure and Short Term Changes in Lung Function in Dutch Children*, JEAEE, 3 (Suppl. 1), págs. 28-117.
- CCAD (Comisión Centroamericana de Ambiente y Desarrollo) (2009), *Base de datos SIG de mesoamérica/CCAD-BM 2002* (<http://www.ccad.ws/mapas/mapoteca.htm>).
- CEAC (Consejo de Electrificación de América Central) (2009), *Plan indicativo regional de expansión de la generación, período 2009-2023*, mayo.
- CEPAL (2009^a), *Istmo Centroamericano: Estadísticas del subsector eléctrico. Informe preliminar del segmento de la producción de electricidad (Datos actualizados a 2008)* (LC/MEX/L.905), México, D. F., 20 de abril.
- _____ (2009b), CEPALSTAT, Base de datos de población (<http://websie.eclac.cl/sisgen/ConsultaIntegrada.asp?idAplicacion=1&idTema=1&idioma=e>).
- _____ (2009c), *Distribución espacial de la población y urbanización en América Latina y El Caribe*, CELADE (<http://www.eclac.cl/celade/depualc/>).
- _____ (2007), *Estrategia energética sustentable Centroamérica 2020* (LC/MEX/L. 828), México, D. F., 30 de noviembre.
- _____ (2003), *Revisión de metodologías utilizadas para la estimación de las externalidades* (LC/MEX/L.556), México, 12 de junio, Proyecto Uso Sustentable de Hidrocarburos, ONU, CEPAL (<http://www.eclac.cl/mexico/>).
- CEPAL-SEMARNAT (2007), *Evaluación de externalidades ambientales del sector energía en las zonas críticas de Tula y Salamanca* (LC/MEX/L.788/Rev.1), México, D. F., 11 de septiembre).
- _____ (2004), *Evaluación de las externalidades ambientales de la generación termoeléctrica en México* (LC/MEX/L.644), México, D. F., 22 de noviembre.
- César, H. y otros (2000), *Proyecto ecosistema urbano y salud de los habitantes de la zona metropolitana del Valle de México* (ECOURS), Módulo A: “Valoración económica del mejoramiento de la calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de México”, Comisión Ambiental Metropolitana y Banco Mundial, México, D. F.
- Ministerio de Economía de El Salvador, Dirección General de Estadística y Censos, *Censo de población de El Salvador* (<http://www.digestyc.gob.sv/>).
- Dockery D. y otros (1993), “An association between air pollution and mortality in six US cities”, in *New England Journal of Medicine*, Vol. 329, págs. 1753-1759.
- EPA (United States Environmental Protection Agency) (2009), *Factor Information Retrieval (FIRE), Software* (<http://www.epa.gov/ttnchie1/software/fire/index.html>).
- _____ (2006), *Manual de costos de control de contaminación del aire*, Sexta edición.
- _____ (2000), EPA-454/R-99-005, *Meteorological Monitoring Guidance for Regulatory Modeling Applications Office of Air Quality Planning and Standards Air Clean*, United States Office of Air Quality Environmental Protection Planning and Standards Agency Research Triangle Park, NC 27711, Estados Unidos.
- _____ (1995), EPA-454/B-95-003a, “User’s Guide for Industrial Source Complex (ISC3)”, *Dispersion Models*, Vol. I., User Instructions, Office of Air Quality Planning and Standards Emissions, Monitoring, and Analysis Division Research Triangle Park, North Carolina, Estados Unidos.
- _____ (s/f), “Compilation of air pollutant emission factors, AP-42, 5th Edition”, Vol. I: *Stationary Point and Area Sources* (www.epa.gov).
- _____ (s/f), “Nitrogen oxides (NOx)”, *National Ambient Air Quality Standards*, (<http://www.epa.gov/ttn/naaqs/standards/nox/>),
- _____ (s/f), “Technology transfer network support center for regulatory air models”, *Meteorological Data: Stations*, TX23044 El Paso/Int’l Arpa (<http://www.epa.gov/scram001/tt24.htm>).
- _____ (s/f), “Technology transfer network”, Centro de Información sobre Contaminación del Aire (CICA) para la frontera entre Estados Unidos y México (http://www.epa.gov/ttn/catc/cica/atech_s.html) y (<http://www.epa.gov/ttn/catc/products.html#software>).
- _____ (2003), *Aermod Latest Features and Evaluation Results*, EPA 454/R-03-003.
- (s/f), EPA-452/F-03-059. Hoja de Datos – Tecnología de control de contaminantes del aire. Filtro de tela del tipo de limpieza por chorro pulsante.
- European Commission (2005), “ExternE, Externalities of energy”, *Methodology 2005 update*, EIR-Universität Stuttgart, Alemania, págs. 124-132.

- _____ (2003), *External costs research results on socio-environmental damages due to electricity and transport*, EUR 20198.
- _____ (1998), *External Costs of Energy: Application of the ExternE Methodology in France* (<http://externe.jrc.es>).
- _____ (1998), "Externalities of energy", Vol. 7: *Methodology 1998 Update* (EUR 19083); Vol. 8: *Global Warming* (EUR 18836); Vol. 9: *Fuel Cycles for Emerging and end-Use Technologies, Transport and waste* (EUR 18887); Vol. 10: *National Implementation* (EUR 18528), Directorate-General XII, Science Research and Development, Office for Official Publications of the European Communities, L-2920 Luxembourg, F75272, Paris, Cedex 06, Francia.
- _____ (1995), "Externalities of energy", ISBN 92-827-5210-0, Vol. 1: *Summary* (EUR 16520); Vol. 2: *Methodology* (EUR 16521); Vol. 3: *Coal and Lignite* (EUR 16522); Vol. 4: *Oil and Gas* (EUR 16523); Vol. 5: *Nuclear* (EUR 16524); Vol. 6: *Wind and Hydro fuel Cycles* (EUR 16525), Directorate-General XII, Science Research and Development, Office for Official Publications of the European Communities, L-2920, Luxemburgo.
- _____ (s/f), "Información de ExternE" (<http://www.externe.info/>) y (<http://externe.jrc.es/overview.html>).
- Fundación Mexicana para la Salud (1994), *Economía y salud*, "Propuestas para el avance del sistema de salud en México", Informe final, México, D. F.
- Google, Programa Google Earth (<http://earth.google.com/>).
- Health Effects Institute (1993), "Revised analyses of the national morbidity, mortality and air pollution study, Part II. Revised analyses of selected time", *series Studies* (<http://www.healtheffects.org>).
- Ibarrarán, M., E. Guillomen, I. Zepeda y J. Hammit (2002), *Estimate of the Economic Value of Reducing Health Risk by Improving Air Quality in Mexico City*, Preliminary Results, México, D. F., inédito.
- INE (Instituto Nacional de Ecología) (2004), "Evaluación del impacto de las emisiones de la termoeléctrica de Tuxpan en la calidad del aire de la región, usando el sistema de modelado de dispersión", CALMET-CALPUFF, Informe final, México, D. F., inédito.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática) (2003), *Cuaderno N° 19*, "Estadísticas del sector salud y seguridad social", edición 2002, México, D. F.
- _____ (2001), *Censo de Población INEGI 2000. Población total por municipio, edad desplegada y grupos quinquenales de edad y su distribución según sexo*, México, D. F. (www.inegi.gob.mx).
- Instituto Nacional de Estadística de Honduras, *Censo de población de Honduras* (<http://www.ine-hn.org/>).
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (1996), "IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories: Reference Manual" (<http://www.ipcc.ch/>).
- Laffont, J. J. (1988), "Fondements de l'économie publique", *Económica*, París.
- Leksell, I. y A. Rabl (2001), "Air pollution and mortality: Quantification and valuation of years of life lost", *Risk Analysis*, Vol. 21, N° 5.
- Long range Energy Alternatives Planning System, LEAP (2009) (<http://www.energycommunity.org/default.asp?action=47>).
- Markandya, A., L. Hudson y T. Taylor (2002), *Valuing the human health effects of routine atmospheric releases from nuclear facilities*, preparado para el Organismo Internacional de Energía Atómica.
- McKinley, G. y otros (2003), "The local benefits of global air pollution control in Mexico City", Instituto Nacional de Ecología, México, D. F. (www.ine.gob.mx).
- Milford, J. y C. Davidson (1987), "The sizes of particulate sulfate and nitrate in the atmosphere", *A Review Journal of Air Pollution Control Association*, 37, págs. 125-134.
- Millock, Katrin, Céline Nauges y Thomas Sterner (s/f), *Environmental Taxes: A Comparison of French and Swedish Experience from Taxes on Industrial Air Pollution*, Göteborgs Universitet (<http://www.hgu.gu.se/files/nationalekonomi/personal/thomas%20sterner/a66.pdf>), sin fecha.
- Molina, E., C. Barceló, L. A. Bonito y C. Puerto (1996), "Factores de riesgo de cáncer pulmonar en Ciudad de La Habana", *Revista Cubana Higiene Epidemiológica*.
- Molina, Mario (2002), *Air Quality in Mexico Megacity: An Integrated Assessment*, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Estados Unidos, Kluwer Academic Publishers.
- Napolitano Sam, Jeremy Schreifels y otros (2007), *The U.S. Acid Rain Program: Key Insights from the Design, Operation, and Assessment of a Cap-and-Trade Program*, United States Environmental Protection Agency, Elsevier, Vol. 20, Issue 7, agosto-septiembre.
- OIEA (Organismo Internacional de Energía Atómica) (2003), *SIMPACTS: Simplified Approach for Estimating Impacts of Electricity Generation*, multilanguage version.

- _____(s/f), *Economic Valuation of Environmental Impacts*, Training Workshop.
- OMS (Organización Mundial de la Salud) (1997), *Health and Environment in Sustainable Development. Five Years after the Earth Summit*, Executive Summary, Ginebra, págs. 9-30.
- OPS/OMS (Organización Panamericana de la Salud) (2000), “La salud y el ambiente en el desarrollo sostenible”, *Publicación Científica N° 572*, Washington, D. C.
- Ostro, B. (1996), *A Methodology for Estimating Air Pollution Health Effects*, Organización Mundial de la Salud, Ginebra.
- Pigou, A. (1944), *The Economics of Welfare*, 4ª edición, Macmillan & Co., Londres.
- Pope, C. y otros (1995), “Particulate air pollution as a predictor of mortality in a prospective study of US adults”, in *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, vol. 145, págs. 669-674.
- Rabl, A. (2002), *Airpacts Exposure Response Functions*, Organismo Internacional de Energía Atómica, Austria.
- Sahr, Robert (2009), *Inflation Conversion Factors for Dollars 1774 to be estimated 2019* (<http://oregonstate.edu/cla/polisci/faculty-research/sahr/cv2006.pdf>) marzo.
- Schindler, C., U. Ackermann-Liebrich, P. Leuenberger y Ch. Monn (1998), “Associations between lung function and estimated average exposure to NO₂ in eight areas of Switzerland”, *Epidemiology* 1998, 9(4): 405-11.
- Secretaría de Salud/Sistema Nacional de Información en Salud (2000), *Anuario 2000*, “Mortalidad”, cuadro 2, Defunciones y mortalidad general (cruda y estandarizada por edad) por sexo, según entidad federativa de residencia habitual, México, D. F. (www.salud.gob.mx).
- _____(2000), *Anuario 2000*, “Morbilidad”, cuadro II.2. Egresos hospitalarios por grupos de edad, según causa a lista mexicana, México, D. F. (www.salud.gob.mx).
- Sheridan, P., C. Broca y J. Wilson (1990), “Aerosol particles in the upper troposphere and lower stratosphere: Elemental composition and morphology of individual particles in Northern Midlatitudes”, *Geophysical Research Letter* 21, págs. 2587-2590.
- Spadaro, J. (2002a), *Airpacts Equations for Impact and Damage Cost Assessments*, Organismo Internacional de Energía Atómica, Austria.
- _____(2002b), *Airpacts Input Data: Meteorological data*, Organismo Internacional de Energía Atómica, Austria.
- _____(2002c), *Airpacts Input Data: Receptor data*, Organismo Internacional de Energía Atómica, Austria.
- _____(2002d), *Airpacts Input Data Requirements*, Organismo Internacional de Energía Atómica, Austria.
- _____(2002e), *Airpacts Input Data: Source Characteristics*, International Atomic Energy Agency, Austria.
- _____(2002f), *Airpacts Manual, A Tool for Assessing the Environmental Impacts and Damage Costs to Human Health, Agricultural Crops and Man-made Structures from Exposure to Routine Atmospheric Emissions*, International Atomic Energy Agency, Austria.
- _____(1999), *Quantifying the Impacts of Air Pollution*, Centre d’Énergétique, École de Mines de Paris, París.
- Turtós, L. y otros (2007), “Assessment of the impacts on health due to the emissions of Cuban power plants that use fossil fuel oils with high content of sulfur. Estimation of external costs”, *Atmospheric Environment* 41 (2007), 2202–2213.
- US Department of State (Departamento de Estado de los Estados Unidos de Norteamérica) (2009), *Reportes sobre el estado de los derechos humanos (2008)*, *Country Reports on Human Rights Practices* (<http://www.state.gov/g/drl/rls/hrrpt/2008/index.htm>).

ANEXOS

ANEXO I

TECNOLOGÍAS DE CONTROL DE EMISIONES PARA CENTRALES TERMOELÉCTRICAS

Las emisiones de contaminantes al ambiente en la generación de electricidad dependen de dos factores primordiales: el combustible que se utilice y la tecnología de combustión y de control de emisiones.

A fin de establecer recomendaciones sobre las tecnologías de control adecuadas para cada planta, es necesario primero contar con un inventario detallado a nivel de central y de cada una de las unidades en las centrales, de información sobre los combustibles utilizados (según sus características de contenido de azufre y otros compuestos), así como sobre las tecnologías de combustión y en su caso de control de emisiones. En Centroamérica dicho inventario no está disponible, por lo que en esta evaluación se ha hecho el supuesto de que las centrales existentes no cuentan con tecnologías de control. Se reconoce que este supuesto puede cambiar en los próximos años y que algunas plantas, particularmente aquellas financiadas con fondos internacionales, pueden empezar a contar con dichos controles.

Una evaluación integral sobre tecnologías de control requiere además de un inventario detallado de las condiciones de las centrales, un análisis integral de otros parámetros (como la antigüedad de las centrales, los diagramas de las instalaciones a fin de considerar factibilidad de dimensiones de los equipos, entre otros) y circunstancias propias del mercado centroamericano. Sin embargo, se consideró conveniente incluir este anexo para brindar elementos cualitativos al lector sobre las opciones de control existentes a nivel internacional y típicamente usadas en la industria de generación de electricidad.

La información sobre tecnologías de control incluida en este anexo proviene de una revisión de la información de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), disponible en su “Red de Transferencia de Tecnología”, en su portal de Internet y, en particular, mediante su Centro de Tecnología para el Aire Limpio (Clean Air Technology Center)³³. La EPA genera tecnologías disponibles para el control de contaminantes atmosféricos y las pone a disposición del público en general de forma gratuita. La traducción al español del original fue realizada gracias al proyecto de cooperación fronteriza México-Estados Unidos. El crédito de la traducción y difusión de esta información es de la EPA y de dicho proyecto de cooperación, y se presenta en este Anexo con la intención de colaborar con el esfuerzo de la Red de Transferencia Tecnológica y presentar extractos de esta información para los países centroamericanos.

Se precisa que mayor información puede encontrarse directamente en la página de la EPA y que también existe un Manual de Costos (EPA, 2006), que puede servir a los expertos de cada central para realizar estimaciones sobre los costos, según las características propias de sus procesos y equipos. Evidentemente esto no sustituye un análisis detallado de las tecnologías, pero permite una discusión con elementos más concretos sobre las tecnologías necesarias para las centrales.

1. Tecnologías para el control de partículas

Las tecnologías de control de partículas pueden agruparse en dos grandes categorías: el grupo de “prelimpiadores”, y los dispositivos de captura final. El primer grupo a menudo se utiliza para precipitar, fundamentalmente con medios mecánicos, el material particulado de mayor tamaño y las partículas

³³ Para mayor información sobre la información de las tecnologías, véase Technology Transfer Network-Clean Air Technology Center-RACT/BACT/LAER Clearinghouse (<http://cfpub.epa.gov/rblc/htm/bl02.cfm>).

abrasivas. Esto permite posteriormente utilizar tecnologías para captar el material más fino, que por lo regular son equipos más costosos.

Es conveniente recordar que el material particulado que impacta a la salud es muy fino, regularmente menor a 10 μm y se ha comprobado que el más dañino es menor a 2,5 μm , ya que es el que logra penetrar hasta los pulmones. Sin embargo, el material particulado de mayor diámetro también genera costos externos que no fueron calculados en este estudio, especialmente por daños a materiales y construcciones y por el impacto visual.

a) **Cámaras de asentamiento**³⁴

Las cámaras de asentamiento, también conocidas como cámaras de asentamiento por gravedad, colectores por gravedad, cámaras de expansión y cámaras de caída, son prelimpiadores de partículas. A las cámaras de asentamiento de múltiples bandejas también se les conoce como cámaras Howard de asentamiento y hacen posible la remoción de partículas al reducir la velocidad del gas, al permitir que el polvo se asiente por la acción de la gravedad. La mayoría de los diseños sólo atrapan de manera efectiva partículas de diámetro mayor a 50 μm aproximadamente, aunque su efectividad no es muy alta y, sobre todo para material particulado fino, es muy baja.

Las plantas generadoras de calor y las de electricidad han utilizado cámaras de asentamiento para recolectar partículas grandes de carbón no quemado, con el fin de reinyectarlas a los generadores de vapor. Son particularmente útiles en industrias en las que además se requiere enfriar la corriente de gas antes del tratamiento con filtros de tela.

Las cámaras de asentamiento que utilizan la gravedad como medio de asentamiento son los colectores mecánicos más simples y antiguos. Por lo general, se construyen en forma de cámaras largas, horizontales y rectangulares, con la entrada en un lado y la salida en el techo o en el lado opuesto. Dentro de las cámaras, el flujo debe ser uniforme y sin ningún mezclado macroscópico. El flujo uniforme se obtiene a menudo mediante rectificadores de flujo en la entrada de la cámara. Se utilizan tolvas para recolectar el polvo asentado, aunque también se emplean cadenas de arrastre y transportadores de tornillo.

El sistema de remoción de polvo debe estar sellado para prevenir entradas de aire hacia la cámara, lo que aumentaría la turbulencia, levantaría el polvo y evitaría que fuera descargado adecuadamente del equipo.

Las ventajas de las cámaras de asentamiento son: bajos costos de capital y de energía; no hay partes móviles, por lo tanto, son pocos los requerimientos de mantenimiento y bajos los costos de operación; excelente funcionamiento; baja caída de presión; el equipo no está sujeto a la abrasión, debido a la baja velocidad del gas, y proporciona enfriamiento incidental de la corriente de gas. Las limitaciones de temperatura y presión dependen únicamente de los materiales de construcción, y recolección y disposición en seco.

Algunas de las desventajas son: bajas eficiencias de recolección, específicamente para partículas menores a 50 μm ; imposibilidad de manejar materiales pegajosos o aglutinantes; gran tamaño físico, y las cámaras de bandejas múltiples se pueden deformar durante la operación a altas temperaturas.

Generalmente, la instrumentación normal para las cámaras de asentamiento incluye solamente un indicador de diferencial de presión estática. Un aumento en la caída de presión estática podría obstruirla.

³⁴ EPA-452/F-03-043, Hoja de Datos-Tecnología de Control de Contaminantes del Aire.

Las cámaras de asentamiento han sido reemplazadas por ciclones, debido principalmente a la mayor eficiencia de recolección y a su menor requerimiento de espacio.

b) Filtros de tela³⁵

Los filtros de tela pueden ser de tres tipos fundamentalmente: filtros de limpieza con sacudimiento mecánico mejorado con o sin bocina sónica; filtros por chorro pulsante y filtros con aire invertido o chorro invertido mejorado con o sin bocina sónica. Los tres tipos comparten características similares y se diferencian por el método principal para realizar la limpieza de los gases de escape y filtrar las partículas.

En general, en un filtro de tela, se hace pasar el gas residual por una tela de tejido apretado o de fieltro, lo que causa que la materia particulada en el gas sea recolectada en la tela por tamizado y por otros mecanismos. Los filtros de tela pueden ser de forma de hojas, cartuchos o bolsas (éstas son las más comunes), con un número de unidades individuales encasillados en grupo. La plasta de polvo que forman las partículas recolectadas sobre el filtro puede aumentar de manera significativa la eficiencia de recolección.

A los filtros de tela se les conoce frecuentemente como “casas de bolsas” porque la tela está configurada por lo general en bolsas cilíndricas de seis a nueve metros de largo y de 12,7 a 30,5 cm de diámetro. Se colocan grupos de bolsas en compartimientos aislables para permitir la limpieza de las bolsas o reemplazar algunas de ellas sin tener que parar todo el filtro de tela.

El sacudimiento mecánico ha sido un método muy popular de limpieza por muchos años, debido a su simplicidad y efectividad. En una operación típica, el gas empolvado se introduce por un conducto de entrada al filtro de tela limpiado por sacudimiento y las partículas más grandes son removidas de la corriente de gas cuando golpean un deflector en el conducto de entrada y caen en la tolva. Una placa de celda succiona el gas cargado de partículas hacia el piso y hacia las bolsas del filtro.

Mediante el conducto de salida, el gas procede del interior de las bolsas hacia el exterior. Las partículas son recolectadas en la superficie interior de las bolsas y se acumula una plasta en el filtro. En las unidades con sacudimiento mecánico, la parte superior de las bolsas está unida a una barra sacudidora, que se mueve abruptamente (en dirección horizontal) para limpiar las bolsas. Las barras sacudidoras se operan con motores mecánicos o a mano, en aplicaciones en las que la limpieza no se requiere frecuentemente.

El método de limpieza por vibración es similar a las unidades con sacudimiento mecánico. Utiliza una vibración del marco de la bolsa generada neumáticamente, de alta frecuencia y baja amplitud, para limpiar las bolsas. Este método tiene aplicaciones limitadas debido a su limpieza de baja energía y al diseño más pequeño de la casa de bolsas.

Las bocinas sónicas se utilizan cada vez más para mejorar la eficiencia de recolección de los filtros de tela limpiados por sacudimiento mecánico o con aire a la inversa. Dichas bocinas utilizan aire comprimido para hacer vibrar un diafragma y producir una onda sonora de baja frecuencia en la campana de la bocina. La superficie de la tela y el número de compartimientos de la casa de bolsas determinan el número de bocinas necesarias. Típicamente, se requieren de una a cuatro bocinas por compartimiento, operando de 150 a 200 hertz. El aire comprimido para las bocinas se suministra de 275 a 620 kilo-Pascales (kPa) (40 a 90 libras por pulgada cuadrada manométricas (psig)) y se activan de 10 a 30 segundos aproximadamente durante cada ciclo de limpieza.

³⁵ EPA-452/F-03-060.

Como la limpieza con bocinas sónicas reduce significativamente la carga residual de polvo en las bolsas, se reduce de 20% a 60% la caída de presión a través del filtro de tela. También aminora el esfuerzo mecánico requerido para limpiar las bolsas, lo que resulta en una vida de operación más larga. Esto puede bajar el costo de operación y mantenimiento de 1% a 3% anualmente. Los compartimientos de las casas de bolsas son fácilmente reconvertidos a bocinas sónicas. El apoyo sónico es frecuentemente utilizado con filtros de tela en calderas de termoeléctricas que queman carbón.

Entre las ventajas de los filtros de tela se incluyen: altas eficiencias de recolección tanto para partículas finas como gruesas, relativamente insensibles a las fluctuaciones en las condiciones de la corriente de gas; en el caso de filtros con limpieza continua, la eficiencia y la caída de presión permanecen relativamente invariables con fuertes cambios en la carga de entrada de polvo; el aire de salida del filtro es bastante limpio y en muchos casos puede ser recirculado dentro de la planta (para conservar energía); el material recolectado (que sale seco) para procesarlo o disponer de él; normalmente, no tienen problemas la corrosión ni la oxidación de sus componentes, y su operación es relativamente simple.

A diferencia de los precipitadores electrostáticos, los sistemas de filtros de tela no requieren del uso de alto voltaje, por lo que el mantenimiento se simplifica y podría recolectarse el polvo inflamable con el cuidado apropiado. El uso de ayudas selectas de filtración granulares o fibrosas (preimpregnado) permite recolectar con alta eficiencia contaminantes gaseosos y humos de tamaños menores a una micra. Los recolectores están disponibles en un gran número de configuraciones, lo que resulta en un rango de dimensiones y de localizaciones de las bridas de entrada y salida, para cumplir con los requisitos de instalación.

Las desventajas son que para temperaturas muy superiores a los 290° C se requiere implementar el uso de telas metálicas o de mineral refractario especial, que aumenta considerablemente los costos. Para ciertos tipos de polvos, se pueden requerir telas tratadas para reducir la percolación de los mismos o, en otros casos, para facilitar la remoción del polvo recolectado. Las concentraciones de algunos polvos en el colector, aproximadamente de 50 g/m³, pueden representar un peligro de fuego o explosión, si se produce una llama o una chispa accidental o si se recolecta polvo rápidamente oxidable. Los filtros de tela tienen requerimientos altos de mantenimiento (por ejemplo, reemplazo periódico de las bolsas). La vida de la tela puede ser acortada debido a temperaturas elevadas y en presencia de constituyentes gaseosos o particulados ácidos o alcalinos. No pueden ser operados en ambientes húmedos; los materiales higroscópicos, la condensación de humedad o los materiales adhesivos espesos pueden causar costras o tapar la tela o requerir aditivos especiales. Se pudiera necesitar protección respiratoria para el personal de mantenimiento al reemplazar la tela. Se requiere una caída de presión mediana, típicamente en el rango de 100 a 250 mm de columna de agua (4 a 10 pulgadas de columna de agua).

Los filtros de tela son útiles para recolectar partículas con resistividades, ya sea demasiado bajas, o demasiado altas como para ser recolectadas con precipitadores electrostáticos. Por lo tanto, los filtros de tela pueden ser buenos candidatos para recolectar las cenizas volantes de los carbones bajos en azufre o las cenizas volantes que contengan niveles altos de carbón sin quemar, que tienen alta y baja resistividad respectivamente, y son, por lo tanto, relativamente difíciles de recolectar con precipitadores electrostáticos.

La proporción de flujo volumétrico de la corriente del contaminante y la carga del contaminante determinan los costos. En general, una unidad pequeña que controla una carga baja de contaminante no será tan efectiva en costo como una unidad grande con una carga alta de contaminante.

La limpieza con aire invertido³⁶ es un método popular de limpieza de filtros de tela que ha sido extensamente utilizado y mejorado. Es un mecanismo limpiador más ligero que el sacudimiento mecánico, pero a veces menos efectivo. La mayoría de los filtros de tela con aire invertido operan de una manera similar a los que se limpian por sacudimiento. De la misma forma, las bolsas están abiertas en el fondo, cerradas en la parte superior, el gas fluye de la parte interior a la parte exterior de las bolsas y se captura el polvo en el interior. Sin embargo, algunos diseños con aire invertido recolectan el polvo en el exterior de las bolsas. En cualquiera de los diseños, esta limpieza se lleva a cabo al forzar el aire limpio por medio de los filtros en la dirección opuesta al flujo del gas empolvado. El cambio de dirección del flujo del gas causa que la bolsa se doble y quiebre la plasta de polvo. En la recolección de la plasta interna, se permite que las bolsas se desintegren hasta cierto grado. Por lo general, se evita que las bolsas se desintegren por completo mediante algún tipo de soporte, tal como anillos cosidos a las bolsas. Este soporte permite que la plasta de polvo caiga de las bolsas hacia la tolva. El flujo invertido del gas también propicia desprender la plasta de polvo. Debido a que las telas de fieltro retienen el polvo más que las tejidas, y por lo tanto son más difíciles de limpiar, las felpas no son usadas comúnmente en sistemas con aire invertido.

Existen varios métodos para invertir el flujo mediante los filtros. Tal como con los filtros de tela limpiados con un sacudidor mecánico, el enfoque más común es tener compartimientos separados dentro del filtro, de manera que cada uno pueda ser aislado y limpiado por separado, mientras los otros compartimientos continúan operando con el gas cargado de polvo. Un método para proporcionar el flujo invertido del aire es por medio del uso de un ventilador secundario o de gas limpio de los otros compartimientos. La limpieza sólo con aire invertido es utilizada únicamente en casos en los que el polvo se desprende fácilmente de la tela. En muchos casos, el aire invertido se utiliza en conjunto con sacudimiento, pulsos o bocinas sónicas.

La limpieza de los filtros de tela con chorro de aire pulsante es la más nueva de las tres. Este mecanismo puede tratar cargas altas de polvo, ya que opera con una caída de presión constante y ocupa menos espacio que otros tipos de filtros de tela. Los filtros de tela limpiados por chorro pulsante sólo se pueden manejar como dispositivos para recolectar las capas externas de la plasta de polvo. Las bolsas están cerradas por el fondo, abiertas en la parte superior y reforzadas por retenedores internos, llamados jaulas. El gas cargado de partículas fluye al interior de la bolsa al utilizarse ocasionalmente difusores para evitar que las partículas más grandes dañen las bolsas.

El gas fluye desde afuera hacia adentro de las bolsas y de ahí hacia la salida. Las partículas se recolectan en el exterior de las bolsas y caen hacia una tolva debajo del filtro de tela. Durante la limpieza por chorro pulsante, un pulso corto, de 0,03 a 0,1 segundos de duración, de aire a alta presión, 415 a 830 kilo-Pascales (kPa), se inyecta dentro de las bolsas. El pulso se sopla por una boquilla venturi en la parte superior de las bolsas y establece una onda de choque que continúa hacia el fondo.

La onda dobla la tela, la separa de la jaula y después la junta, mientras desaloja la plasta de polvo. Un contador de tiempo remoto conectado a una válvula selenoide regula el ciclo de limpieza. La válvula selenoide controla el pulso de aire, descargado por tubos de viento equipados con boquillas colocadas por encima de las bolsas. Por lo general, las bolsas se limpian hilera por hilera.

La limpieza por chorro pulsante³⁷ tiene varios atributos que los otros no poseen. Debido a que el pulso de limpieza es breve, no se necesita suspender el flujo del gas empolvado durante la limpieza. Las

³⁶ EPA-452/F-03-061, Hoja de Datos - Tecnología de Control de Contaminantes del Aire. Filtro de Tela-Tipo Limpieza con Aire-Invertido.

³⁷ EPA-452/F-03-059.

otras bolsas continúan filtrando y recibiendo una carga extra, debido a que los filtros se limpian. En general, la caída de presión o el comportamiento de los filtros de tela no cambian como consecuencia de la limpieza por chorro pulsante. Esto permite que el equipo sea operado en forma continua, mientras que las válvulas selenoides son las únicas partes móviles importantes. La limpieza por chorro pulsante es también más intensa y ocurre con mayor frecuencia que los otros métodos de limpieza de filtros de tela. Esta limpieza intensa desprende casi toda la plasta de polvo cada vez que se pulsa la bolsa. Como resultado, los filtros con limpieza por chorro pulsante no dependen de la capa de polvo para realizar la filtración. Las telas de fieltro (no tejidas) son utilizadas porque no requieren de una plasta de polvo para alcanzar altas eficiencias de recolección. Se ha encontrado que las telas tejidas que se utilizan en estos filtros dejan escapar mucho polvo después de limpiarlas.

Puesto que para limpiar las bolsas por el método de chorro pulsante no se requieren aislar, los filtros de tela limpiados por chorro pulsante no necesitan compartimientos adicionales para mantener una adecuada filtración durante la limpieza. Además, debido a la naturaleza intensa y frecuente de la limpieza, pueden tratar una proporción más alta de flujos de gas, con mayores cargas de polvo. Consecuentemente, los filtros de tela limpiados por el método de chorro pulsante pueden ser de menor tamaño que otros tipos de filtros de tela para tratar la misma cantidad de gas y polvo y lograr proporciones más altas de gas-a-tela.

Una desventaja específica de las unidades con chorro pulsante que utilizan velocidades muy altas de gas, es que el polvo de las bolsas limpiadas puede ser arrastrado inmediatamente hacia las otras bolsas. Si esto ocurre, sólo un poco del polvo cae en la tolva y la plasta de polvo sobre las bolsas se vuelve muy gruesa. Para prevenir esto, los filtros de tela con chorro pulsante pueden ser diseñados con compartimientos separados que se puedan aislar para ser limpiados.

c) **Ciclones**³⁸

A los ciclones también se les conoce como ciclones colectores, ciclones separadores, separadores centrífugos y separadores inerciales. En las aplicaciones donde operan muchos ciclones pequeños en paralelo, al sistema total se le conoce como ciclón de tubos múltiples, multiciclón o multiclón. Normalmente, los ciclones se utilizan para controlar material particulado mayor a PM_{10} , por lo que se usan como equipo de prelavado, pero se pueden diseñar también para obtener eficiencias aceptables para recolectar PM_{10} y $PM_{2.5}$.

Los márgenes de la eficiencia de control para los ciclones individuales se basan con frecuencia en tres clasificaciones: convencional, alta eficiencia y alta capacidad. El rango de eficiencia de control de los ciclones individuales convencionales se estima entre 70% y 90% para partículas grandes; entre 30% y 90% para PM_{10} y entre 0% y 40% para $PM_{2.5}$.

Los ciclones individuales de alta eficiencia están diseñados para alcanzar mayor control de las partículas pequeñas, ya que pueden remover partículas de 5 μm con eficiencias hasta de 90%, y así alcanzar mayores eficiencias con partículas más grandes. Los rangos de eficiencia de control de los ciclones individuales de alta eficiencia se ubican entre 80% y 99% para partículas grandes; entre 60% y 95% para PM_{10} y entre 20% y 70% para $PM_{2.5}$. Los ciclones de alta eficiencia tienen mayores caídas de presión, lo que requiere de mayores costos de energía para mover el gas sucio mediante el ciclón. Por lo general, una limitación especificada de caída de presión determina el diseño del ciclón, en lugar de cumplir con alguna eficiencia de control especificada.

³⁸ EPA-452/F-03-005, Hoja de Datos EPA-CICA Ciclones.

Los ciclones de alta capacidad sólo están garantizados para remover partículas mayores de 20 μm , aunque en cierto grado ocurra la colección de partículas más pequeñas. Los rangos de eficiencia de control de los ciclones de alta capacidad se ubican entre 80% y 99% para partículas grandes; entre 10% y 40% para PM_{10} y entre 0% y 10% para $\text{PM}_{2.5}$.

Los ciclones utilizan la inercia para remover las partículas de la corriente del gas, al impartir una fuerza centrífuga a la corriente de gas, normalmente en una cámara de forma cónica. Al crear un vórtice doble dentro del cuerpo del mismo, el gas que entra es forzado a bajar por el cuerpo del ciclón con movimiento circular cerca de la superficie del tubo del ciclón. En el fondo del ciclón, la dirección del gas se invierte y sube en espirales por el centro del tubo y sale por la tapa.

La fuerza centrífuga del gas en rotación fuerza las partículas en la corriente del gas hacia la pared del ciclón, pero se le opone la fuerza de arrastre del gas que pasa por el ciclón hacia la salida. Con las partículas más grandes, la inercia vence a la fuerza de arrastre y hace que las partículas alcancen la pared del ciclón para ser colectadas. Con las partículas más pequeñas, la fuerza de arrastre es mayor que la inercia, lo que ocasiona que las partículas salgan del ciclón junto con el gas. La gravedad también hace que las partículas más grandes que llegan a la pared del ciclón bajen hacia la tolva. Aunque utilizan el mismo mecanismo de separación que los separadores por impulso, los ciclones son más efectivos porque tienen un patrón de flujo de gas más complejo.

Las ventajas de los ciclones son: a) bajos costos de capital; b) no tienen partes móviles, por lo que necesitan pocos requerimientos de mantenimiento y bajos costos de operación; c) caída de presión relativamente baja (2 a 6 pulgadas de columna de agua), comparada con la cantidad de partículas removida; d) las limitaciones de temperatura y presión dependen únicamente de los materiales de construcción; e) colección y disposición en seco, y f) requisitos espaciales relativamente pequeños.

Entre las desventajas se incluyen: a) eficiencias de colección relativamente bajas; b) no pueden manejar materiales pegajosos o aglomerantes, y c) las unidades de alta eficiencia pueden tener altas caídas de presión.

d) Elutriadores³⁹

Los elutriadores se utilizan como prelimpiadores para remover las partículas de mayor tamaño. Su eficiencia de control es similar a la de las cámaras de asentamiento con la diferencia de que los primeros se diseñan para remover partículas mayores.

Un elutriador es esencialmente una cámara vertical de asentamiento; consisten de uno o más tubos verticales o torres en serie, dentro de los cuales fluye hacia arriba una corriente de gas contaminado con polvo, con una velocidad definida por la rapidez del flujo del gas y el área de la sección transversal del tubo. Las partículas grandes, con velocidades terminales de asentamiento superiores a la velocidad del flujo hacia arriba del gas, son separadas y recolectadas en el fondo de la cámara. Las partículas más pequeñas con menores velocidades de asentamiento son arrastradas fuera del colector. El tamaño de partícula que se atrapa puede variar si se cambia la velocidad del gas. La clasificación por tamaño de las partículas atrapadas puede lograrse si se utiliza una serie de tubos con diámetros cada vez mayores. Por lo general, se emplean las tolvas para recolectar al material asentado. El sistema de remoción de polvo debe estar sellado para prevenir la entrada de aire a la cámara, lo que aumenta la turbulencia, causa arrastre de polvo en el gas y evita la descarga adecuada del polvo del equipo.

³⁹ Hoja de Datos EPA-CICA-Elutriadores.

Algunas ventajas de los elutriadores son: a) bajos costos de capital; b) bajos costos de energía; c) no hay partes móviles, por lo que son pocos los requerimientos de mantenimiento y bajos los costos de operación; d) excelente funcionamiento; e) baja caída de presión por medio del equipo; f) el equipo no está sujeto a la abrasión, debido a las bajas velocidades del gas; g) proporciona el enfriamiento incidental de la corriente de gas; h) las limitaciones de temperatura y presión son dependientes únicamente de los materiales de construcción, e i) colección y disposición en seco.

Entre las desventajas se incluyen: a) su eficiencia de colección de partículas es baja; b) son inadecuados para materiales pegajosos o aglutinantes, y c) son muy grandes.

e) **Depurador por condensación**⁴⁰

Los depuradores por condensación se encuentran en la categoría de depuradores húmedos. La descripción más detallada de los depuradores húmedos se incluye en las tecnologías de control de SO₂, ya que se utilizan fundamentalmente en la industria eléctrica para controlarlo, aunque también ayudan a controlar las partículas.

Sin embargo, este tipo especial de depurador húmedo, el depurador por condensación, se utiliza fundamentalmente para controlar partículas finas PM₁₀ y PM_{2.5} y es un avance relativamente reciente en la tecnología de depuración en húmedo. La mayoría de los depuradores convencionales se atienen a los mecanismos de impacto y difusión para lograr el contacto entre las partículas y las gotas de líquido. En un depurador por condensación, las partículas actúan como núcleos de condensación para formar gotas. Generalmente, la depuración por condensación depende que primero se establezcan condiciones de saturación en la corriente de gas, para luego inyectar vapor en la corriente de gas. El vapor crea una condición de súper saturación y conduce a la condensación de agua sobre las partículas finas en la corriente de gas. En seguida, las gotas condensadas grandes son removidas por uno de los varios dispositivos convencionales, como un eliminador de neblina de alta eficiencia.

Para controlar las partículas provenientes de fuentes de combustión, el gas de escape entra a una área de coagulación (por ejemplo, un sistema de ductos, una cámara, o un ciclón) para reducir el número de partículas ultrafinas, y en seguida a un acondicionador de gases para enfriar el gas hasta una temperatura y un estado de saturación convenientes. Esto generalmente se logra por medio de un intercambiador de calor por recuperación de calor de desecho para reducir la temperatura del gas de escape o al rociar agua directamente dentro de la corriente de gas caliente de escape. Por lo general, no es ni práctico ni efectivo enfriar los gases de escape a temperaturas por debajo de los valores del ambiente. Los depuradores por condensación están generalmente indicados para usarse corriente abajo de otro depurador (por ejemplo, un depurador tipo venturi) que ya haya removido las partículas mayores a PM₁₀.

Entre las ventajas de los depuradores por condensación se incluyen: a) capacidad para manejar polvos inflamables y explosivos con poco riesgo; b) capacidad para controlar partículas finas; c) la eficiencia de recolección puede ser variada, y d) los gases corrosivos y polvo pueden ser neutralizados.

Las desventajas son: a) el líquido efluente puede crear problemas de contaminación del agua; b) el producto de desecho se recolecta en húmedo; c) alto potencial para problemas de corrosión; d) se requiere protección contra el congelamiento; e) el gas de salida puede necesitar recalentamiento para evitar una pluma visible; f) el material particulado que se recolecta puede estar contaminado, y puede no ser reciclable, y g) la disposición de residuo fangoso puede ser muy costoso.

⁴⁰ Hoja de Datos EPA-CICA-Depurador por Condensación.

Es importante señalar que los depuradores en húmedo generan residuos en forma de pasta húmeda. Esto crea la necesidad tanto del tratamiento de aguas residuales como de la disposición de residuos sólidos. Inicialmente, la pasta húmeda es tratada para separar el residuo tóxico del agua. El agua tratada puede entonces ser reutilizada o descargada. Si el residuo sólido es inerte y no tóxico, por lo general puede ser desechado en un relleno sanitario. Los residuos tóxicos tendrán procedimientos más estrictos para su disposición. En algunos casos el residuo sólido puede tener valor y puede venderse o reciclarse.

f) Depurador tipo Venturi⁴¹

Los depuradores tipo venturi, también conocidos como depuradores de chorro tipo venturi, depuradores por aspersión atomizadores de gas, y eyectores depuradores tipo venturi, son del tipo húmedo.

Un depurador tipo venturi acelera la corriente del gas de desecho para atomizar el líquido depurador y así mejorar el contacto entre el gas y el líquido. En un depurador tipo venturi se construye una sección de “garganta” en el interior del ducto, que fuerza a la corriente de gas a acelerarse a medida que el ducto se estrecha y se expande. A medida que el gas entra en la garganta tipo venturi, tanto la velocidad como la turbulencia del gas aumentan. Según el diseño del depurador, el líquido depurador es rociado dentro de la corriente de gas antes de que el gas se encuentre con la garganta tipo venturi, o en la garganta, o hacia arriba en contra del flujo de gas. Entonces, el líquido depurador se atomiza en pequeñas gotas por la turbulencia en la garganta y la interacción entre las gotas y las partículas se eleva. Algunos diseños usan aspersiones suplementarias atomizadas hidráulicamente o neumáticamente para acrecentar la creación de gotas. La desventaja de estos diseños es que se requiere un suministro de líquido limpio para evitar obstruirlo.

Después de la sección de la garganta, la mezcla se desacelera, y se causa una aglomeración de gotas mediante impactos posteriores. Una vez que las partículas han sido capturadas por el líquido, las partículas humedecidas y las gotas de líquido en exceso se separan de la corriente de gas por una sección de arrastre que suele consistir de un separador ciclónico y/o un eliminador de neblina.

Los diseños actuales para los depuradores tipo venturi generalmente utilizan el flujo vertical de gas hacia abajo por medio de la garganta tipo venturi e incorporan tres puntos principales: 1) una sección de entrada de acercamiento en húmedo o pared inundada para evitar una acumulación de polvo en una intersección entre lo seco y lo húmedo; 2) una garganta ajustable para la garganta tipo venturi para proveer ajuste de la velocidad del gas y la caída de presión, y 3) un codo inundado localizado por debajo del venturi y adelante del separador por arrastre para reducir el desgaste por las partículas abrasivas. La garganta venturi a veces se recubre con una capa refractaria para resistir la abrasión por las partículas de polvo.

Las ventajas de los depuradores tipo venturi son: a) pueden manejar polvos inflamables y explosivos con bajo riesgo; b) pueden manejar neblinas; c) un mantenimiento relativamente bajo; d) su diseño e instalación son simples; e) la eficiencia de recolección puede ser variada; f) proporcionan enfriamiento para los gases calientes, y g) los gases corrosivos y polvos pueden ser neutralizados.

Entre las desventajas se incluyen las siguientes: a) el líquido efluente puede crear problemas de contaminación del agua; b) el producto de desecho se recolecta en húmedo; c) un alto potencial de problemas de corrosión; d) se requiere protección contra el congelamiento; e) el gas de escape puede requerir recalentamiento para evitar una pluma visible; f) las partículas recolectadas pueden estar contaminadas, y pueden ser material no reciclable, y g) la disposición del residuo puede ser muy costosa.

⁴¹ EPA-452/F-03-017, Hoja de Datos EPA-CICA Depurador Tipo Venturi.

g) Precipitador electrostático⁴²

Los precipitadores electrostáticos permiten controlar las partículas, incluso las finas PM_{10} y $PM_{2.5}$, así como otros contaminantes del aire, como los metales que existen en forma de partículas (salvo el mercurio que se encuentra en forma de vapor). Las eficiencias típicas (límites alcanzables/reducciones) de equipos nuevos varían entre 99% y 99,9%. Los equipos existentes más antiguos tienen un rango de eficiencia de operación de 90% a 99,9%. Aunque son varios los factores que determinan la eficiencia de recolección de los PES, el más importante es su tamaño, ya que determina el tiempo de tratamiento, pues a medida que una partícula permanezca más tiempo en el PES, es más probable que sea atrapada.

Cuando gran parte del cargamento de contaminantes consiste en partículas relativamente grandes se pueden utilizar recolectores mecánicos para el pretratamiento de los gases, como los ciclones o las torres lavadoras para reducir la carga sobre el PE, especialmente en concentraciones altas de entrada. A veces se utiliza equipo para acondicionar gases con el fin de mejorar el funcionamiento de los PE al cambiar la resistividad del polvo como parte integral del diseño original, pero con mayor frecuencia se utiliza para modernizar los PE existentes. El equipo inyecta un agente dentro de la corriente gaseosa anterior al PES. Por lo general, el agente se mezcla con las partículas y altera su resistividad para promover una velocidad de migración más alta, y por lo tanto, una mayor eficiencia de recolección. Los agentes acondicionadores utilizados incluyen SO_3 , H_2SO_4 , compuestos de sodio, amoníaco y agua.

Un PE es un dispositivo para controlar partículas que utiliza fuerzas eléctricas con el fin de movilizar las partículas encauzadas dentro de una corriente de emisión hacia las superficies de recolección. Se imparte una carga eléctrica a las partículas encauzadas cuando pasan por medio de una corona, una región donde fluyen los iones en fase gaseosa. Los electrodos ubicados en el centro del plano del flujo se mantienen a un alto voltaje y generan un campo eléctrico que fuerza a las partículas hacia las paredes recolectoras. En los PES, los recolectores son golpeados o “martillados” por varios métodos mecánicos para desprender las partículas que se deslizan hacia una tolva en donde son recolectados. A medida que se llena la tolva, ésta es evacuada de forma periódica. El polvo se retira por una válvula hacia un sistema que administra el polvo, como una cinta neumática, y después se desecha de manera apropiada.

En un PE de tipo tubo-alambre, el gas emitido fluye horizontalmente y en paralelo a las placas verticales de metal en hoja. El espacio entre las placas varía típicamente entre 19 y 38 cm. Los electrodos de alto voltaje son alambres largos con pesas en su extremo inferior y están colgados entre las placas. Algunos diseños posteriores utilizan electrodos rígidos (tubos huecos de aproximadamente 25 a 40 mm de diámetro), en lugar del alambre. Dentro de cada sendero de flujo, el gas debe pasar cada alambre en secuencia a medida que fluye por la unidad. Las superficies de flujo entre las placas son llamados ductos, cuya altura varían típicamente entre 6 y 14 m.

El voltaje aplicado a los electrodos causa que el gas entre los electrodos se descomponga eléctricamente, acto conocido como “corona.” Se suele impartir una polaridad negativa a los electrodos porque una corona negativa tolera un voltaje más alto antes de producir una chispa que una corona positiva. Los iones generados en la corona siguen las líneas del campo eléctrico desde el electrodo hasta las superficies colectoras. Por lo tanto, cada combinación de tubo y electrodo establece una zona de carga por la que deben pasar las partículas. Puesto que las partículas mayores ($>10 \mu m$ de diámetro) absorben varias veces más iones que las menores ($>1 \mu m$ de diámetro), las fuerzas eléctricas son mucho más altas en las partículas mayores.

⁴² EPA-452/F-03-028 Hoja de Datos EPA-CICA Precipitador Electroestático Seco (PES), Tipo Placa-Alambre.

Las ventajas son: a) tienen bajas de presión, por lo que los costos de operación tienden a ser bajos; b) alcanzan eficiencias muy altas, aun con partículas muy pequeñas; c) pueden ser diseñados para un rango amplio de temperaturas de gases y manejar temperaturas altas, hasta los 700° C; d) recolectar y eliminar el residuo se realiza en seco; e) las velocidades de flujo relativamente grandes se pueden manejar de manera efectiva.

Entre las desventajas se incluyen: a) altos costos de capital; b) los electrodos de descarga fabricados de alambre requieren altos niveles de mantenimiento; c) puede presentarse corrosión cerca de la parte superior de los alambres debido al efecto de fugas de gas y a la condensación ácida; d) los alambres largos sujetos con pesas tienden a oscilar, la parte media del alambre puede acercarse al tubo y causar un mayor número de chispas y desgaste, aunque los nuevos diseños de PE tienden a utilizar los electrodos rígidos; e) los PE también son difíciles de instalar en sitios con espacio limitado, puesto que los PES deben ser relativamente grandes para obtener las bajas velocidades de gas necesarias para la recolección eficiente de PM.

Ciertas partículas son difíciles de recolectar debido a sus características de resistividad demasiado altas o bajas. Puede existir un peligro de explosión al tratar gases combustibles y/o recolectar partículas combustibles. Se requiere personal de mantenimiento relativamente calificado, así como de precauciones especiales para proteger al personal del alto voltaje. Los PES no son recomendables para eliminar partículas pegajosas o húmedas.

Los polvos con resistividades muy altas tampoco son idóneos para la recolección en PE. Como estas partículas no se cargan fácilmente, no se recolectan con facilidad. Además, las partículas de alta resistividad generan capas de ceniza con pendientes de voltaje muy altas sobre los electrodos colectores. La ceniza flotante proveniente de la combustión del carbón bajo en azufre tiene típicamente una resistividad alta, y por ello es difícil de recolectar.

2. Tecnologías para el control de SO₂⁴³

El proceso de desulfuración de gas de salida o depuración de SO₂ típicamente usa un reactivo alcalino de base de calcio o sodio. Se inyecta el reactivo al gas de salida en una torre de aspersión o directamente dentro del conducto; el SO₂ es absorbido, neutralizado y/u oxidado por el reactivo alcalino y convertido en un compuesto sólido, ya sea calcio o sulfato de sodio. El sólido es removido de la corriente de gas residual con equipo corriente abajo. Los depuradores son clasificados como “de un solo uso” o “regenerables”, con base en la forma en que son manejados los sólidos generados por el sistema. Los sistemas de un solo uso o desechan como residuo el absorbente agotado, o lo utilizan como subproducto, mientras que los sistemas regenerables reciclan el absorbente. Actualmente, los costos de los procesos regenerables superan al de los procesos de un sólo uso; sin embargo, los procesos regenerables son elegidos si el espacio o las opciones de disposición son limitadas y hay un mercado de venta para los subproductos (yeso).

Ambos tipos de sistemas pueden ser también clasificados en húmedos, secos o semisecos. Cada uno de estos procesos se describe a continuación. Aproximadamente 85% de los sistemas instalados en los Estados Unidos son sistemas húmedos, 12%, de aspersión en seco y 3%, de sistemas secos. Por lo general, la adaptabilidad de la absorción de gases como un método de control de la contaminación depende de los siguientes factores: la disponibilidad del solvente adecuado; la eficiencia de remoción requerida; la concentración del contaminante en el vapor de entrada; la capacidad requerida para el manejo de gas de desecho, y el valor de recuperación de los contaminantes o el costo de desechar el solvente no recuperado.

⁴³ EPA-452/F-03-065 EPA-CICA, Hoja de Datos Desulfuración del Gas de Chimenea.

a) Sistemas húmedos

En un sistema de torre de limpieza húmeda, el gas de salida se conduce hacia la torre de aspersión, donde se inyecta un lodo acuoso del sorbente en el gas de salida. Para proporcionar un buen contacto entre el gas y el sorbente, se diseña la ubicación de las boquillas de inyección, de tal forma para optimizar el tamaño y la densidad de las gotas de lodo formadas por el sistema. Una parte del agua en el lodo es evaporada y la corriente de gas residual se satura con vapor de agua. El dióxido de azufre se disuelve en las gotas de lodo donde reacciona con las partículas alcalinas. El lodo cae hacia el fondo del absorbedor para recolectarlo. El gas de salida ya tratado pasa por medio de un eliminador de vapor antes de salir del absorbedor, el que remueve cualquier gota de lodo arrastrada. El efluente del absorbedor se envía al tanque de reacción donde se completa la reacción SO_2 -alcáli, lo que forma una sal neutra. En un sistema regenerable, el lodo utilizado es reciclado hacia el absorbedor. Los sistemas de un solo uso, deshidratan el lodo empleado para su disposición o para su uso como subproducto.

El material absorbente típico es la piedra caliza o la cal. La piedra caliza es bastante económica, aunque las eficiencias de control de sus sistemas están limitadas a aproximadamente 90%. La cal es más fácil de manejar y tiene eficiencias de control de hasta 95%, pero es significativamente más costosa. Los absorbentes patentados con aditivos que aumentan su reactividad proveen eficiencias de control superiores a 95%, pero son muy costosas. Las plantas eléctricas almacenan grandes volúmenes de piedra caliza o cal en el sitio y preparan el absorbente para inyectarlo, pero esto no es generalmente efectivo en costo para aplicaciones industriales más pequeñas.

La relación del volumen entre el reactivo del lodo y el gas residual es conocida como la relación de líquido a gas (L/G), que determina la cantidad de reactivo disponible para la reacción con el SO_2 . Los valores altos de L/G resultan en eficiencias de control más altas, así como la oxidación de SO_2 , que da lugar a una disminución de la formación de incrustaciones en el absorbedor. Los costos de O&M son una función directa del uso del reactivo, por lo que, si crece la L/G, se amplía el costo anual. Las relaciones de L/G son aproximadamente de 1:1 para torres de limpieza húmedas y se expresan en litros de lodo /1000Nm³ de gas de salida.

La oxidación del lodo en el absorbedor forma incrustaciones de yeso (sulfato de calcio) en el absorbedor. La oxidación forzada de la piedra caliza (Limestone forced oxidation, LSFO) es un proceso más reciente basado en la depuración húmeda que reduce la formación de hojuelas. En la LSFO se añade aire al tanque de reacción, que oxida al lodo usado y lo convierte en yeso. El yeso es removido del tanque de reacción antes de reciclarse en el absorbedor. El lodo reciclado tiene una menor concentración de yeso y se reduce considerablemente la incrustación en el absorbedor. El yeso puede ser vendido comercialmente, lo que elimina la necesidad de desecharlo en un relleno sanitario. Además del control de la incrustación, los cristales de yeso formados en la LSFO son más grandes y se sedimentan y deshidratan con mayor eficiencia, lo que reduce el tamaño del equipo de manejo del subproducto. Sin embargo, la LSFO requiere ventiladores adicionales, lo que incrementa los costos de capital y anual del sistema.

La limpieza húmeda con caliza tiene altos costos de capital y de operación debido al manejo del líquido reactivo y del residuo. No obstante, es el proceso preferido por las plantas generadoras de electricidad que queman carbón debido al bajo costo de la piedra caliza y las eficiencias de control de SO de 90% hasta 98%.

b) Sistemas semisecos

Los sistemas semisecos, o secadores de aspersión, inyectan un lodo acuoso del absorbente de modo similar al del sistema húmedo, aunque el lodo tiene una concentración mayor de absorbente. A medida que el gas de salida caliente se mezcla con la solución de lodo, el agua de éste se evapora, mientras el agua que permanece en el sorbente sólido aumenta la reacción con el SO_2 . El proceso forma un residuo seco, recolectado por un dispositivo de control de materia particulada, tal como una casa de bolsa o un precipitador electrostático (ESP). El residuo puede desecharse, venderse o reciclarse en el lodo.

Varios reactivos de base de calcio y sodio pueden ser utilizados como absorbentes. Típicamente, las torres de limpieza de aspersión en seco inyectan cal, ya que es más reactiva que la piedra caliza y menos costosa que los reactivos a base de sodio. El lodo del reactivo es suministrado por medio de atomizadores rotatorios o boquillas de doble fluido para crear un rocío de gotas más finas que en los sistemas de limpieza húmeda.

El rendimiento de una torre de aspersión en seco con cal es más sensible a las condiciones operativas. Se requiere una aproximación cercana a la temperatura adiabática de saturación para maximizar la remoción de SO_2 . Sin embargo, el exceso de humedad depone los sólidos húmedos en el absorbedor y en el equipo corriente abajo. La temperatura óptima es de 10°C a 15°C por debajo de la temperatura de saturación. Debido a la limitación de la humedad en el gas, deben utilizarse relaciones L/G más bajas, aproximadamente de 1:3. El gas de salida con altas concentraciones de SO_2 o con altas temperaturas, reducen el desempeño de la torre de limpieza.

Las eficiencias de control de SO_2 en las torres de limpieza de aspersión en seco son ligeramente más bajas que la de los sistemas húmedos, entre 80% y 90% debido a su baja reactividad y relaciones de L/G. La aplicación de un solo absorbedor de aspersión en seco está limitada a unidades de combustión de menos de 200 MW. Las unidades de combustión más grandes requieren múltiples sistemas de absorbedores. El costo de capital y de operación de las torres de limpieza de aspersión en seco es más bajo que el de las torres de limpieza húmedas porque no se requiere el equipo para manejar los residuos húmedos.

c) Sistemas secos

En los sistemas de inyección de sorbente seco se administra neumáticamente el sorbente en polvo dentro de la chimenea, del economizador o del ducto corriente abajo. Se remueve el producto de desecho seco usando equipo de control de particulado, tal como una caja de bolsa o un precipitador electrostático. El gas de salida es generalmente enfriado antes de intervenir el dispositivo de control de partículas. Puede inyectarse agua corriente arriba del absorbedor para aumentar la remoción de SO_2 .

Típicamente, los sistemas de sorbente seco usan reactivos alcalinos a base de calcio o sodio, aunque también se dispone de un gran número de reactivos patentados. Un sistema de inyección común usa varias lancetas de inyección que sobresalen de las paredes del horno o del conducto. La inyección de agua corriente abajo de la inyección del sorbente incrementa la remoción de SO_2 del absorbente.

Las torres de limpieza en seco tienen costos de capital y anuales significativamente más bajos que los sistemas húmedos porque son más simples, demandan menos agua y la disposición de residuos es menos complicada. Los sistemas de inyección en seco se instalan fácilmente y ocupan menos espacio, por lo que son buenos candidatos en aplicaciones de reconversión. Las eficiencias de remoción de SO_2 son significativamente más bajas que las de los sistemas húmedos, entre 50% y 60% para absorbentes con base en calcio. La inyección de absorbente seco con base en sodio puede alcanzar hasta 80% de eficiencia de

control. Este tipo se considera como la tecnología emergente de control de SO₂ para aplicaciones industriales pequeñas. Las aplicaciones más recientes de inyección de sorbente seco en calderas pequeñas de carbón han alcanzado eficiencias de control de SO₂ superiores a 90%.

Entre las ventajas: a) presentan eficiencias de remoción de SO₂ de 50% hasta 98%; b) los productos de la reacción pueden ser reutilizables; c) la dificultad de reconversión es moderada o baja, y d) los reactivos son económicos y son disponibles fácilmente.

Las desventajas son: a) presentan altos costos capitales y de operación y mantenimiento, y b) tienen problemas de incrustación y deposición de sólidos húmedos en el absorbedor y en el equipo corriente abajo. Los sistemas húmedos generan un producto de desecho húmedo y pueden causar una pluma visible; no pueden usarse para concentraciones de SO₂ en gases residuales mayores de 2.000 ppm. Recolectar los residuos aumenta significativamente los costos de operación y mantenimiento.

3. Tecnologías para el control de NO_x

a) Reducción selectiva no catalítica (*Selective Non Catalytic Reduction, SNCR*)⁴⁴

Los dispositivos de control SNCR reducen las emisiones de NO_x mediante una reacción química generada por un agente. Los niveles de reducción de NO_x varían entre 30% y 50%, aunque pueden alcanzarse reducciones de 65% a 75% con SNCR aplicada en conjunto con controles de combustión, como los quemadores de bajo NO_x.

La SNCR es más adecuada que la Reducción Catalítica Selectiva para aplicaciones con altos niveles de partículas en la corriente de gas residual.

El escabullimiento de amoníaco se refiere a las emisiones de amoníaco no reaccionado que resulta de la reacción incompleta del NO_x y de la sustancia. Este escabullimiento puede formar sales de amoníaco, que pueden tapar o corroer los componentes del sistema corriente abajo; la absorción de amoníaco en la ceniza flotante, que puede afectar la disposición o reutilización de la ceniza, y el aumento de la visibilidad de pluma de contaminante. En los Estados Unidos, los niveles permitidos de escabullimiento de amoníaco son típicamente de 2 a 10 ppm.

El óxido nitroso (N₂O) es un subproducto formado en la SNCR. La reducción con base de urea genera más N₂O que los sistemas de base en amoníaco. Como máximo, 10% del NO_x reducido en la SNCR con base de urea se convierte a N₂O. El óxido nitroso no contribuye a la formación de ozono ni de ácido a nivel del suelo.

La SNCR está basada en la reducción química de la molécula de NO_x a nitrógeno molecular (N₂) y vapor de agua (H₂O). Un agente reductor (reactivo) a base de nitrógeno, como el amoníaco o la urea, se inyecta en el gas después de la combustión. Se favorece la reacción de reducción con NO_x sobre otras reacciones químicas, a temperaturas que varían entre los 870° C y los 1.150° C, por lo que es considerado como un proceso químico selectivo.

Ambos, el amoníaco y la urea, son usados como reactivos. Los sistemas a base de urea tienen ventajas sobre los otros. La urea no es tóxica, es un líquido menos volátil y puede ser almacenado y manejado con mayor seguridad. Sus gotas pueden penetrar más en el gas de combustión cuando se

⁴⁴ EPA-452/F-03-062 EPA-CICA, Hoja de Datos Reducción Selectiva No Catalítica (SNCR).

inyectan dentro de la caldera, y así mejorar el mezclado con el gas, lo que es difícil en calderas grandes. Sin embargo, la urea es más costosa que el amoníaco. La razón estequiométrica normalizada (*Normalized Stoichiometric Ratio*, NSR) define la razón de reactivo requerida para alcanzar la meta de reducción de NO_x. En la práctica, se necesita inyectar al gas en la caldera, más reactivo que la cantidad teórica para obtener un nivel específico de reducción de NO_x.

En el proceso de la SNCR, la unidad de combustión actúa como una cámara de reacción. El reactivo generalmente se inyecta dentro de las regiones radiantes y convectivas del supercalentador y del recalentador, donde la temperatura del gas de combustión está dentro del rango requerido. El sistema de inyección está diseñado para promover el mezclado del reactivo con el gas de combustión. Los perfiles de temperatura y los patrones de flujo dentro de la unidad de combustión determinan el número y la ubicación de los puntos de inyección.

Ciertas aplicaciones son más adecuadas para la SNCR debido al diseño de la unidad de combustión. Las unidades con temperaturas de salida del fogón de 1.550° F a 1.950° F (840° C a 1.065° C), con tiempos de residencia mayores a un segundo y con altos niveles de NO_x no controlado son buenos candidatos.

Durante la operación con baja carga, la ubicación de la temperatura óptima sube dentro del interior de la caldera. Para las operaciones con cargas bajas, se requieren puntos adicionales de inyección, mientras que para bajar el rango de temperatura en el que ocurre la reacción de reducción de NO_x, pueden agregarse mejoradores al reactivo. Usar mejoradores reduce la necesidad de generar puntos de inyecciones adicionales.

Las ventajas de la SNCR son: a) los costos de capital y de operación están entre los más bajos de todos los métodos de reducción de NO_x; b) la reconversión de la SNCR es relativamente simple y requiere poco tiempo de paro en unidades grandes y medianas; c) es efectivo en costo para uso estacional o aplicaciones de carga variable; d) acepta corrientes de gas residual con niveles altos de partículas, y e) puede aplicarse con controles de combustión para proporcionar mayores reducciones de NO_x.

Las desventajas son: a) la corriente de gas debe estar dentro de un rango de temperatura específico; b) no es aplicable a fuentes con bajas concentraciones de NO_x tales como las turbinas de gas; c) menores reducciones de NO_x que con la Reducción Selectiva Catalítica (SCR); d) puede requerir limpieza del equipo corriente abajo, e) resulta en amoníaco en la corriente del gas residual, que puede impactar la visibilidad en la pluma y la reventa o la disposición de la ceniza.

b) Reducción catalítica selectiva (SCR, por sus siglas en inglés)⁴⁵

Este dispositivo de control de emisiones de NO_x también utiliza la reducción química por medio de un agente reductor y un catalizador. La SCR disminuye entre 70% y 90% de NO_x, aunque reducciones mayores son factibles, a pesar de ser demasiado costosas. Esta tecnología se utiliza comúnmente en las calderas generadoras de electricidad, turbinas de gas y motores recíprocos de combustión interna.

Los costos de capital superan significativamente a otros tipos de controles de NO_x debido al gran volumen de catalizador que se requiere. La SCR es una tecnología patentada y los diseños en unidades grandes de combustión son específicos al sitio donde se aplican.

⁴⁵ EPA-452/F-03-063 ,EPA-CICA, Hoja de Datos Reducción Catalítica Selectiva (SCR).

El proceso de la SCR disminuye químicamente la molécula de NO_x a nitrógeno molecular y vapor de agua. Un reactivo a base de nitrógeno, como el amoníaco o la urea, se inyecta en los ductos, corriente abajo de la unidad de combustión. Los gases de combustión se mezclan con el reactivo y entran a un módulo reactor que contiene un catalizador. Los gases de chimenea calientes y el reactivo se difunden mediante el catalizador. El reactivo reacciona selectivamente con el NO_x dentro de un rango de temperatura específico y en presencia del catalizador y del oxígeno.

La temperatura, la cantidad del agente reductor, el diseño de la rejilla de inyección del amoníaco y la actividad del catalizador son los factores principales que determinan la eficiencia de remoción real. El uso del catalizador tiene dos ventajas principales del proceso de la SCR sobre la SNCR: mayor eficiencia de control de NO_x y reacciones dentro de un rango más amplio y más bajo. Además, se presenta un incremento significativo en los costos de capital y de operación.

El catalizador está compuesto de metales activos o cerámicas con una estructura altamente porosa. Las configuraciones de los catalizadores son generalmente de diseños de panal y de placa de metal plisada (monolito). La composición del catalizador, el tipo y las propiedades físicas afectan el funcionamiento, la confiabilidad, la cantidad de catalizador requerido y el costo. El proveedor del sistema de SCR y el del catalizador garantizan generalmente la vida de este último. Los diseños más nuevos aumentan la actividad del catalizador, el área de superficie por unidad de volumen y el rango de temperatura para la reacción de reducción.

Son varias las diferentes localidades corriente abajo de la unidad de combustión donde puede instalarse el sistema de la SCR. La mayoría de las aplicaciones de carbón sitúan el reactor corriente abajo del economizador y corriente arriba del calentador de aire y de los dispositivos de control de particulado (lado caliente). El gas de combustión en esta localidad está usualmente dentro del rango de temperatura óptima para reacciones de reducción de NO_x que utilizan catalizadores de óxidos de metal. La SCR también puede ser aplicada después del equipo de remoción de azufre y MP (lado frío), aunque puede requerirse el recalentamiento del gas de combustión, lo que incrementa los costos de operación de manera significativa.

La SCR es efectiva en costo en unidades que queman gas. Se requiere menos catalizador, ya que la corriente del gas residual tiene niveles más bajos de NO_x, azufre y MP. Las turbinas de gas de ciclo combinado usan frecuentemente la tecnología de SCR para reducir NO_x. Un diseño común de SCR de ciclo combinado coloca la cámara del reactor después del supercalentador dentro de una cavidad del sistema de recuperación de calor del generador de vapor. La temperatura del gas de combustión en esta área está dentro del rango operativo de catalizadores de base de metal.

La SCR puede ser utilizada por separado o en combinación con otras tecnologías de control de combustión de NO_x, como quemadores de bajo NO_x y requemado de gas natural. La SCR puede ser diseñada para proveer reducciones de NO_x en el año o sólo en la temporada de ozono.

Las ventajas de la SCR son: a) reducciones más altas de NO_x en comparación con los quemadores de bajo NO_x y la SNCR; b) es aplicable a fuentes con bajas concentraciones de NO_x; c) las reacciones ocurren dentro de un rango de temperatura más bajo y más amplio que en la SNCR, y d) no requiere modificaciones a la unidad de combustión.

Las desventajas son: a) costos de capitales y de operación significativamente más altos que los quemadores de bajo NO_x y la SNCR; b) la reconversión de la SCR en calderas industriales es difícil y costosa; c) puede requerir limpieza del equipo corriente abajo, y d) resulta en amoníaco en la corriente del gas de la pluma y la reventa o disposición de la ceniza.

ANEXO II COMPARACIÓN DE EXTERNALIDADES CON OTROS PAÍSES

A fin de presentar los costos externos en un marco de referencia se realiza un breve análisis comparativo de los resultados obtenidos en el presente estudio con los resultados de otros países en desarrollo y en el proyecto ExternE de la Unión Europea. Como se mencionó en el capítulo metodológico, los costos externos son función de una serie de variables agrupadas fundamentalmente en cuatro grandes categorías: 1) características de la fuente y sus emisiones; 2) condiciones de dispersión; 3) población afectada (población en los grupos de riesgo en el dominio de impacto) y funciones exposición respuesta, y 4) valuación económica de los daños.

Es decir, las externalidades pueden ser mayores en distintos países por varias razones, entre ellas, porque las plantas sean efectivamente más contaminantes y tengan mayores emisiones por unidad de generación (usen combustibles sucios, no tengan controles de emisión, entre otras); las condiciones de dispersión sean muy bajas (por ejemplo, cuencas rodeadas de cordilleras); la población afectada en el dominio sea mayor (las plantas se encuentren cercanas a centros de población importante) o exista una sensibilidad muy alta de la población a la contaminación atmosférica, y la diferencia en los valores unitarios de daño que evidentemente están restringidos por el ingreso de los distintos países.

Además, los cálculos varían en función de los modelos utilizados y los supuestos de la modelación. En este anexo se seleccionaron dos estudios realizados con la metodología vías de impacto en países en desarrollo, México (CEPAL-SEMARNAT, 2004) y Cuba (Turtós y otros, 2007), y los resultados globales de ExternE (Comisión Europea, 2003), el proyecto de la Unión Europea que ha aplicado la metodología con mayor detalle.

1. Comparación con estudio en México

La CEPAL y la SEMARNAT realizaron un estudio sobre externalidades ambientales en el Sistema Eléctrico Mexicano (SEM) con la misma metodología de este estudio y el modelo SIMPACTS para evaluar 13 centrales eléctricas que utilizan combustóleo pesado y carbón, con 2000 como año base. Las centrales analizadas en dicho estudio generaron 92,3 TWh en el año de referencia, que equivalía a 75% de la generación a base de combustóleo y carbón en dicho país, y a 48% del total generado por el SEM.

Las externalidades de las 13 plantas se estimaron en 465 millones de dólares al año, con un costo externo ponderado de 0,50 centavos de dólar por kWh. En dicho costo no se incluyó el impacto de emisiones de GEI ni emisiones corriente arriba. En el estudio para Centroamérica se tomaron los mismos supuestos respecto de las funciones exposición-respuesta que utilizadas en el estudio en México anteriormente citado. Evidentemente, los datos de población varían con respecto a los de México para cada país. Sin embargo, la diferencia en los costos externos puede asociarse más fuertemente a los diferenciales de nivel de ingreso de los países centroamericanos y México (véase el cuadro AII-1).

Como se aprecia en dichos cuadros, si se considera el diferencial de ingresos, las externalidades son comparables con los resultados obtenidos en el estudio para Centroamérica. Existen más estudios detallados para México que aplican modelos más complejos de dispersión de contaminantes, pero se consideró conveniente utilizar este estudio con fines comparativos⁴⁶.

⁴⁶ En términos generales, los resultados de dichos estudios arrojan externalidades mayores, ya que se enfocaron a evaluar zonas críticas desde el punto de vista ambiental.

CUADRO AII-1
COSTOS EXTERNOS ESTIMADOS PARA MÉXICO

Central	(Dólares/ton)			(Centavos de dólar/kWh)
	PM ₁₀	SO ₂	NO _x	Externalidad
Tuxpan	219	397	235	0,7
Manzanillo	189	328	193	0,56
Tula	1 157	359	199	0,66
Petalcalco	121	244	144	0,41
Río Escondido	121	93	319	0,26
Salamanca	991	360	200	0,71
Altamira	715	395	227	0,83
Mazatlán	396	278	193	0,59
Puerto Libertad	7	121	72	0,23
Samalayuca	63	132	78	0,2
Rosarito	502	28	619	0,12
Total ponderado				0,5

Fuente: CEPAL-SEMARNAT (2004), *Evaluación de las externalidades ambientales de la generación termoeléctrica en México*.

2. Comparación con estudio en Cuba

El Centro de Investigación Cubaenergía⁴⁷ ha desarrollado estudios muy detallados sobre los costos externos de la electricidad. Cuba genera aproximadamente 92% de su energía a base de combustibles fósiles; las centrales térmicas no cuentan con controles de emisión y el combustible búnker utilizado llega a tener hasta 8% de azufre en peso. En el estudio seleccionado se analizaron los costos externos de tres centrales termoeléctricas y se obtuvieron costos externos del orden de 40 millones de dólares al año y un costo específico ponderado de 1,06 centavos de dólar/kWh.

El costo externo obtenido para Cuba es mayor al de México y Centroamérica. En el estudio en Cuba se utilizaron la metodología vías de impacto y modelos de dispersión más detallados que los incluidos en el SIMPACTS. Por una parte, la diferencia en costos puede atribuirse a que efectivamente las centrales son más contaminantes debido a la calidad del combustible que utilizan y a que la dispersión de contaminantes modelada de forma más detallada arrojó costos más elevados. Por ejemplo, los autores encontraron que el costo del SO₂ es muy elevado y representa 93% del total del impacto.

Por otra parte, al no estar disponible en las bases del Banco Mundial el ingreso per cápita en poder de paridad de compra de Cuba, en el estudio cubano se utilizó el ingreso de América Latina. Desafortunadamente, al no estar disponible dicho indicador, los costos no reflejan precisamente las condiciones económicas cubanas, por lo que se explica que las externalidades estimadas sean mayores a las esperadas, al haber utilizado el ingreso promedio de toda la región para su estimación.

⁴⁷ (<http://www.cubaenergia.cu/>).

3. Comparación con el proyecto de la Unión Europea, Externalities of Energy, ExternE

Finalmente, es útil comparar los resultados con los obtenidos en metodologías más detalladas aplicadas en países en desarrollo. Ello permite ratificar que las metodologías simplificadas arrojan resultados razonables y también que los costos externos se encuentran dentro de lo esperado en países en desarrollo. Por ejemplo, para México se esperarían resultados menores a los estimados para plantas similares en Europa, debido al diferencial en la paridad del poder de compra del ingreso per cápita, *ceteris paribus*. Asimismo, se esperarían costos externos menores para Centroamérica.

Los costos externos estimados por ExternE se presentan en el cuadro AII-2. Para la tecnología de generación con base en carbón, los costos externos se estimaron para los distintos países entre 2 y 15 centavos de euro/kWh; para el caso de petróleo se estimaron entre 2 y 11 centavos de euro/kWh. Los costos externos son evidentemente mucho mayores en Europa que en América Latina. Ello indica que es conveniente avanzar en la aplicación de metodologías detalladas para evaluar costos externos, a pesar de ser consistente con lo esperado, dados los diferenciales en los niveles de desarrollo y una mayor población adulta y por tanto más sensible a la contaminación atmosférica en Europa.

CUADRO AII-2
EXTERNALIDADES AMBIENTALES DE LA ELECTRICIDAD EN EUROPA
(En centavos de euro/kWh^a)

País	Carbón	Peat	Petróleo	Gas	Nuclear	Biomasa	Hydro	PV	Eólica
AT				1-3		2-3	0,1		
BE	4-15			1-2	0,5			0,6	0,05
DE	3-6		5-8	1-2	0,2	3			0,1
DK	4-7			2-3		1			0,2
ES	5-8			1-2		3-5 ^b			
FI	2-4	2-5				1			
FR	7-10		8-11	2-4	0,3	1	1,00		
GR	5-8		3-5	1		0-0,8	1,00		0,25
IE	6-8	3-4							
IT			6-6	2-3			0,3		
NL	3-4			1-2	0,7	0,5			
NO				1-2		0,2	0,2		
PT	4-7			1-2		1,2	0,03		
SE	2-4					0,3	0,07		
UK	4-7		3-5	1-2	0,25	1			0,15

Fuente: Comisión Europea (2003).

^a Se refiere al subtotal cuantificable de efectos externos.

^b Biomasa en combustión con lignitos.