

**NACIONES UNIDAS
COMISIÓN ECONÓMICA
PARA AMÉRICA LATINA
Y EL CARIBE – CEPAL**



Distr.
LIMITADA
17 de agosto de 2004
ORIGINAL: ESPAÑOL

VALORACIÓN DEL IMPACTO DE LAS EMISIONES DE FUENTES FIJAS EN COSTA RICA

Este documento fue preparado por Leonor Turtós Carbonell y Elieza Meneses Ruiz, consultoras de la Unidad de Energía y Recursos Naturales de la Sede Subregional de la CEPAL en México. Las autoras agradecen los comentarios de Fernando Cuevas Moreno, Jefe de la Unidad de Energía y Recursos Naturales, durante la elaboración de la versión final de este documento.

Las opiniones expresadas en este informe, que no ha sido sometido a revisión editorial, son de exclusiva responsabilidad de las autoras y pueden no coincidir con las de la Organización.

INDICE

1	INTRODUCCION	4
1.1	Objetivos del proyecto	4
1.2	Antecedentes	4
1.3	Selección de los casos de estudio.....	4
2	ASPECTOS METODOLOGICOS.....	7
2.1	Metodología Vías de Impacto.....	7
2.2	Criterios para la selección de funciones exposición-repuesta a partir de estudios epidemiológicos.....	13
2.3	Metodología Simplificada: Modelo SIMPACTS de la OIEA.....	16
3	DATOS PARA LOS MODELOS UTILIZADOS	21
3.1	Datos de las fuentes emisoras	21
3.2	Dispersión de las emisiones de contaminantes	23
3.3	Funciones exposición – repuesta consideradas.....	25
3.4	Tasa de incidencia y fracción de la población	27
3.5	Costos de mortalidad y morbilidad	28
3.6	Otros contaminantes.....	30
4	RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGIA	32
4.1	Resultados de la evaluación de emisiones	32
4.2	Resultados de los estudios de dispersión de contaminantes.....	32
4.3	Resultados de la evaluación económica.....	39
	CONCLUSIONES	43
	ANEXO I: INFORME DE REUNIÓN DE TRABAJO 1	44
	ANEXO II: INFORME DE REUNIÓN DE TRABAJO 2.....	46
	ANEXO III: AIRPACTS.....	49
1.1	Modificaciones realizadas al AIRPACTS para adaptarlo a las condiciones de Costa Rica.....	49
1.2	Adaptación del AIRPACTS (AGRIMAT) a las condiciones de Costa Rica	49
1.3	Propuestas de cambios al AIRPACTS (salud) aun no implementadas	49
1.4	Opciones implementadas en AIRPACTS no incluidas en la versión oficial del OIEA solicitadas por Costa Rica	49
	ANEXO IV: DATOS METEOROLOGICOS.....	50
1.1	Opciones en AIRPACTS	50
1.2	Datos meteorológicos estadísticos:	50
1.3	Datos meteorológicos primarios usados por SIMPACTS/ ISCLT2.	50
	REFERENCIAS	54

TABLAS

Tabla 1: Posibles casos de estudio	5
Tabla 2: Datos de entrada requeridos por las diferentes versiones del modelo AIRPACTS	18
Tabla 3: Principales características de las fuentes evaluadas	22
Tabla 4: IRR recomendados ($\%/ \mu\text{g}/\text{m}^3$)	26
Tabla 5: Fracciones de población y tasas de incidencias a emplear por caso de estudio	27
Tabla 6: Valor de 1 AVP en USD con tasa de transferencia de 0.33	29
Tabla 7: Costos unitarios para impactos de morbilidad (USD)	30
Tabla 8: F_{ER} y costo, recomendados para Dioxinas y Furanos	31
Tabla 9: Concentraciones máximas permitidas para evitar daños en la salud	32
Tabla 10: Concentraciones máximas promedio anual	32
Tabla 11: Concentraciones máximas diarias	32
Tabla 12: Datos utilizados en la modelación de la Refinería	37
Tabla 13: Costos Totales para cada contaminante	40
Tabla 14: Costos Totales de los contaminantes primarios	40
Tabla 15: Aportes de los contaminantes primarios y secundarios a los costos Totales	41
Tabla 16: Aportes de los impactos locales y regionales a los costos Totales	41
Tabla 17: Estimados bajo y alto de los costos	41
Tabla 18: USD/ton de contaminante emitido	42
Tabla 19: Contribución de los impactos de mortalidad en los costos totales	42
Tabla 20: Costos Totales en USD/año por contaminante para la Planta Térmica de Limón	42
Tabla 21: Costos específicos en USD/ton y en Cent/kw-h para la Planta Térmica de Limón	43
Tabla 22: Datos meteorológicos requeridos por el SIMPACTS/ISCLT2	50
Tabla 23: Método incluido en el SIMPACTS para estimar las categorías de estabilidad	51
Tabla 24: Método de Turner para estimar la estabilidad atmosférica.	52

FIGURAS

Figura 1: Ubicación de los casos de estudio	6
Figura 2: Pluma Gaussiana en un sistema de coordenadas orientado en la dirección del viento	8
Figura 3: Funciones exposición-respuesta	10
Figura 4: Emisiones anuales de PM_{10} , SO_2 y NO_x consideradas en los cálculos	23
Figura 5: Concentración anual de SO_2 debido a las calderas de El Alto de Ochomogo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	34
Figura 6: Localización de las Fuentes simuladas	38
Figura 7: Contribución de los grupos de fuentes a las emisiones de SO_x	39
Figura 8: Contribución de los grupos de fuentes a las concentraciones de SO_x en el receptor donde se alcanzan las concentraciones máximas	39

1 INTRODUCCION

1.1 Objetivos del proyecto

El objetivo específico del proyecto, “Valoración del impacto de las emisiones de fuentes fijas en Costa Rica”, es estimar las Externalidades generadas por la dispersión de estas emisiones, mediante metodologías simplificadas, y establecer un programa de medición y recolección de datos, así como de estudios complementarios, a fin de poder utilizar metodologías más detalladas para la evaluación de las Externalidades de fuentes fijas a corto plazo y de fuentes móviles asociadas al transporte a mediano plazo.

Se quiere realizar una estimación de las Externalidades producidas por las fuentes de emisión en Costa Rica para usarla como herramienta en la valoración del efecto positivo que tendrían las alternativas de control de la contaminación que se quieren implementar en el país, de forma que estos datos sirvan de insumo para estudios costo-beneficio. Finalmente, se espera como producto adicional de la valoración de las Externalidades, la formación de aptitudes de profesionales en Costa Rica, para implementar esta metodología en otros estudios similares en el país.

La ejecución del proyecto permitirá disponer de un primer levantamiento nacional sobre las Externalidades de fuentes contaminantes fijas, con la información disponible y mediante la formulación de analogías y modelos utilizados en otros países que disponen de mejor información para estos propósitos. Los resultados permitirán tener una primera aproximación a los elementos claves para fundamentar mejor las decisiones que deben tomarse para la revisión, y en su caso, formulación de Normas Oficiales en la materia, para orientar sobre los instrumentos de fomento ambiental aplicables al sector y para contar con elementos de juicio sobre la eventual distorsión de los precios relativos de los energéticos que hasta ahora incorporan de manera insuficiente las Externalidades que se generan en la producción de energía. A partir de los resultados del estudio podrá orientarse y refinarse el análisis en etapas ulteriores, con mejor información. También se dispondrá de un marco de referencia para profundizar, en otros estudios, sobre el componente del precio de los energéticos, atribuible al costo de los recursos naturales no renovables.

1.2 Antecedentes

En Costa Rica existen cerca de 1000 calderas, además de otras fuentes de emisión no contabilizadas en este rubro, tales como: secadores, hornos, plantas de generación eléctrica, etc. Muchas de estas fuentes de emisión de contaminantes atmosféricos se encuentran inmersas en centros de población, por esta razón, existe un impacto local y directo de las emisiones de fuentes fijas de muchas industrias.

Hasta el momento, no se ha valorado esta problemática en el país, aunque se ha emitido reglamentación para las fuentes de emisión, pero los límites son generales para todo el país. Además, no existe ningún estudio de dispersión de contaminantes atmosféricos, como base de estos límites establecidos, sino que se definieron a partir de un estudio de otras regulaciones de países vecinos y países desarrollados.

1.3 Selección de los casos de estudio

Debido a que en el país existen muchas fuentes de emisión fijas, se seleccionaron una muestra de establecimientos con fuentes de emisión que sirvan de prototipo para todo el país, cuyos datos estuvieron disponibles para el estudio. Como principales criterios para caracterización de los establecimientos prototipo se tuvieron en cuenta: los tipos y la magnitud de la emisión de contaminantes atmosféricos, los combustibles utilizados, las alturas de las chimeneas, la topografía del sitio y la ubicación de la fuente (zona rural / urbana o comercial / industrial).

Tomando en cuenta el impacto de las emisiones y la frecuencia de casos que se pueden encontrar en el país y la disponibilidad de datos meteorológicos, se realizó una selección de las fuentes de emisión características:

1. Refinería de Recope
2. Planta Termoeléctrica del ICE en Moin.
3. Industria Nacional de Cemento en Cartago
4. Una caldera acuatubular de un ingenio ubicada en una zona de vientos fuertes (Guanacaste).
5. Un beneficio en la Gran Área Metropolitana.
6. Una planta tostadora de café ubicada en zona urbana.
7. Una zona industrial.
8. Dos Industrias con caldera categoría A B y/o C cercana a una zona residencial
9. Una industria con calderas categoría A, B y/o C en un área rural.

Como posibles casos de estudio de acuerdo a los requerimientos anteriores se manejaron las fuentes que se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 1: Posibles casos de estudio

Caso de estudio	Coordenadas Geográficas Decimales		Elevación (m)
	Longitud	Latitud	
Moin Refinería RECOPE	-83.0926	9.99285	3
Planta Térmica MOIN ICE	-83.0807	9.98503	60
Central Azucarero. Tempisque	-85.5682	10.51561	20
Tostadora La Meseta DORADO	-84.0693	9.94560	1170
Beneficio San Antonio	-84.0418	9.89999	1178
Beneficio Coope-Palmares	-84.4388	10.03934	1030
Beneficio Coopro-Naranjo	-84.3880	10.11169	1144
Café Maravilloso	-84.0422	9.91694	1190
Zona Industrial de Belén			
• Ind.Firestone	-84.1682	9.99364	987
• Del TROPICO	-84.1631	9.98230	993
• CORBEL	-84.1670	9.99101	980
• EL GALLITO	-84.1723	9.99782	982
• TABACALERA	-84.1713	9.99870	987
• Fabrica de Jaleas Belén	-84.1688	9.98903	965
• Industria LIZANO	-84.1660	9.98750	965
El Alto de Ochomogo	-83.9411	9.89600	1570
Fabrica Nacional Licores	-84.3430	10.01798	700
Punto Rojo	-84.2154	10.02201	950
NUMAR	-84.0902	9.92534	1140

Finalmente, de acuerdo a la disponibilidad de todos los datos necesarios y como una primera etapa del trabajo se eligieron definitivamente los siguientes casos (ubicación ver Figura 1):

1. Refinería de Recope
2. Planta Termoeléctrica del ICE en Moin
3. Coopro-Naranjo (beneficio en la Gran Área Metropolitana)
4. Fabrica Nacional de Licores (Industria con caldera categoría A B y/o C en una zona rural, densidad de población local en un área de 10 x 10 km centrada en la fuente de 297 personas/km²))
5. Alto de Ochomogo (Industria con tres calderas categoría B cercana a una zona residencial, densidad de población local en un área de 10 x 10 km centrada en la fuente de 1192 personas/km²))

6. Punto Rojo (Industria con dos calderas categoría A cercana a una zona residencial, densidad de población local en un área de 10 x 10 km centrada en la fuente de 1590 personas/km²)

El proyecto analizó la concentración local de PM₁₀, SO₂ y NO_x en un área de 10 x 10 km centradas en la fuente excepto para la refinería y la planta térmica de Limón. Para la refinería el dominio se extendió a 15 x 15 km. Para la planta térmica no se conocieron todos los datos necesarios de la fuente emisora por lo que no se modeló la dispersión local de los contaminantes y consecuentemente no se obtuvieron las concentraciones locales; para la evaluación de Externalidades se usaron los modelos QUERI y RUWM del AIRPACTS.

En lo que se refiere a la evaluación de impactos, el análisis se centra en la concentración marginal de los contaminantes atribuibles a las fuentes fijas, la densidad de población afectada en la región correspondiente y las hipótesis formuladas sobre las afectaciones en salud, con base de estudios epidemiológicos disponibles.

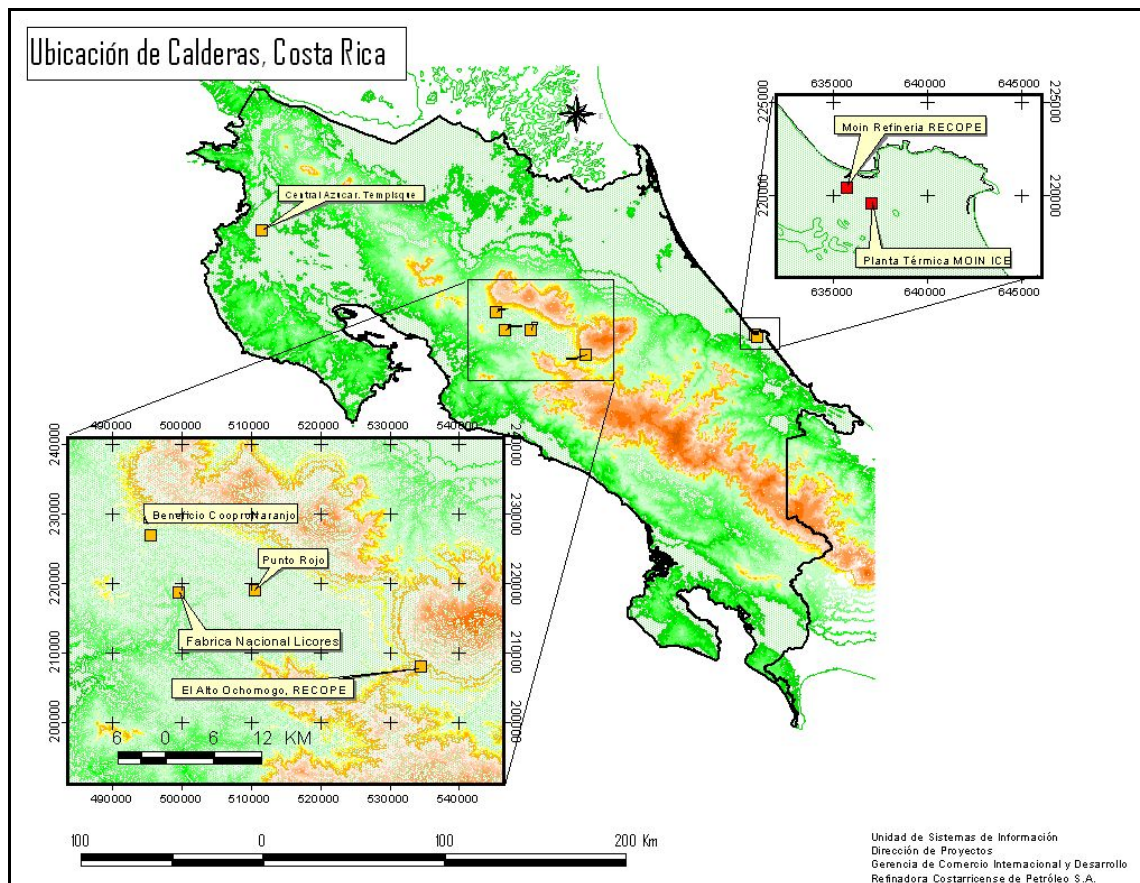


Figura 1: Ubicación de los casos de estudio

2 ASPECTOS METODOLOGICOS

Para la estimación de los costos externos en el marco de la planificación energética han existido diversos enfoques, como el Tratamiento cualitativo, los Costos del control, el Análisis multi-criterio, la Función de daño, entre otros¹. Este último es el más complejo, ya que requiere una gran cantidad de datos de entrada, tanto técnicos, como de salud, medioambientales y de costos. Básicamente consiste en cuantificar los impactos físicos, así como los costos de los daños. En dicho enfoque se basa la Metodología de Vías de Impacto.

Diferentes modelos computacionales se han construido para utilizar esta metodología, algunos muy detallados, con altos requerimientos de información, otros más simplificados, con menores necesidades de datos, pero que en contrapartida, debe aceptarse una serie de aproximaciones en las diversas estimaciones. Entre estos últimos se encuentra el modelo SIMPACTS de la Agencia Internacional de Energía Atómica (OIEA), el cual fue utilizado en el proyecto con algunas modificaciones de acuerdo a las condiciones propias del país.

2.1 Metodología Vías de Impacto

En 1991, la Unión Europea y el Departamento de Energía de Estados Unidos (Oak Ridge National Laboratory) lanzaron un proyecto de investigación conjunta cuyo principal objetivo fue realizar una evaluación comparativa de riesgo de diferentes sistemas de energía, incluyendo, entre otros, el carbón y los ciclos de combustible nucleares. Este esfuerzo inicial fue conocido como “EC-US External Cost of Fuel Cycles Project”. La intención fue desarrollar una metodología común y rigurosa que pudiera ser aplicada para determinar los costos externos de la generación de electricidad en Europa y Estados Unidos. Los trabajos continuaron internacionalmente en el marco de diversos proyectos, con el objetivo de mejorar y extender lo desarrollado y aplicar las metodologías propuestas. Así, en una de las etapas del proyecto ExternE (Externalidades de la Energía),² se utilizó la Metodología de Vías de Impacto para evaluar los costos externos de la generación de electricidad en cada uno de los estados miembros de la Unión Europea para plantas eléctricas individuales, incluyendo varios tipos de combustible. La Metodología de Vías de Impacto comprende cuatro pasos que se describen a continuación.

2.1.1 *Primer paso: caracterización de la fuente emisora*

En el inicio se identifica la localización de la fuente (urbana o rural), sus características físicas y se prepara un inventario detallado de contaminantes emitidos. Los parámetros de la fuente incluyen: el diámetro y la altura de la chimenea por la cual los contaminantes son emitidos, además de la temperatura, velocidad y flujo de gases de escape. Las emisiones son dependientes de la tecnología y del tipo de combustible empleado.

2.1.2 *Segundo paso: dispersión de los contaminantes y cálculo de concentraciones*

La dispersión atmosférica de los contaminantes puede ser dividida en local, cuando se extiende a un área de hasta 50 km alrededor de la fuente, y regional, cuando se extiende más allá de 50 km, hasta alcanzar algunos miles de kilómetros. Dependiendo de la escala (regional o local), se emplean diferentes modelos de transporte de contaminantes para la determinación de 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

¹ Este capítulo se basa en el documento titulado Revisión de metodologías utilizadas para la estimación de las externalidades, Leonor Turtos, CEPAL, 30 mayo 2003.

² Véase <http://externe.jrc.es/>

Gaussianos para estimar los niveles de concentración de los contaminantes primarios para fuentes estacionarias y elevadas (altura de la chimenea por encima del nivel del mar) (Spadaro, 1999)¹. La consideración básica de estos modelos es que una vez que el contaminante es emitido a la atmósfera, los perfiles de concentración vertical y horizontal pueden ser adecuadamente modelados como dos distribuciones Gaussianas independientes, cada una caracterizada por su propia desviación estándar o parámetro sigma (véase la Figura 2).

En general, la concentración C de un contaminante es una función de las coordenadas; (x, y, z) ó (r, θ, z) según el sistema de coordenadas usado, el tiempo t , la tasa de emisión Q , y de otros varios parámetros de transporte atmosférico, como la velocidad y dirección del viento, y la estabilidad atmosférica. Generalmente se asume que el origen del sistema de la coordenada 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 a 2 000 m, dependiendo del grado de turbulencia, la velocidad del viento y la rugosidad de la superficie.

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

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

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).

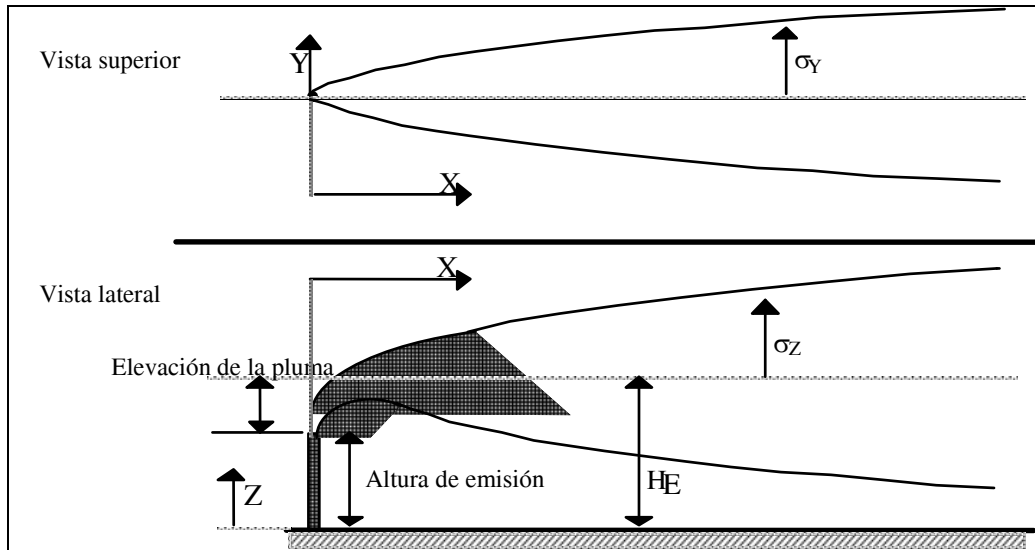


Figura 2: Pluma Gaussiana en un sistema de coordenadas orientado en la dirección del viento

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 considerada más exacta para predecir las concentraciones a largo plazo o anuales, que para estimar las concentraciones instantáneas. Además, en esta expresión se ha asumido que no tienen lugar interacciones químicas en el aire, y las tasas de remoción seca y húmeda son despreciablemente pequeñas. Se debe notar que las concentraciones a determinar dependen altamente de la selección de los parámetros de difusión σ_y y σ_z . Estas variables son frecuentemente determinadas de forma semi-empírica o estadísticamente.

En el ámbito regional, por otra parte, las interacciones químicas entre los contaminantes emitidos y las especies existentes en el aire para formar contaminantes secundarios, y los mecanismos de remoción y desaparición vía deposición seca y húmeda, tienen tanta importancia como los datos meteorológicos en la determinación del destino de los contaminantes, y sus niveles de concentración en el aire.

Como en realidad las concentraciones de los contaminantes secundarios se forman en la atmósfera en un momento posterior a la emisión, generalmente lejos del sitio de emisión, donde el contaminante primario o precursor es transportado y mezclado cada vez más con el aire ambiente debido a la turbulencia, no depende de las condiciones meteorológicas locales ni de los parámetros de la chimenea, y es uniforme por la altura de la capa de mezcla.

De ahí que las especies secundarias sean frecuentemente calculadas utilizando modelos de transporte regional. Estos modelos necesitan para cada una de las celdas del dominio regional considerado, que puede extenderse por miles de kilómetros, la siguiente información: i) datos meteorológicos promediados estadísticamente: velocidades del viento, promediadas entre las 24 direcciones del viento igualmente espaciadas, centradas con respecto a la ubicación del receptor, la frecuencia de ocurrencia o probabilidades de que el viento sople en una dirección dada y la tasa de precipitación anual, y ii) las concentraciones de fondo de especies existentes en el aire, incluidos los propios contaminantes primarios, para simular las reacciones químicas (NH_3 , SO_x , NO_x , O_3)

2.1.3 Tercer paso: evaluación de los impactos

Una vez determinada la concentración de los contaminantes, se procede a calcular los impactos físicos (número de ataques de asma, visitas a hospitales, reducción en la expectativa de vida, etc.), mediante las funciones exposición-respuesta (F_{ER}). Estas funciones relacionan un cambio incremental en los niveles de concentración de los contaminantes (exposición), con un daño o beneficio en un receptor (respuesta). Un receptor es cualquiera que sea afectado de forma adversa o positiva por cambios en los niveles de contaminación del aire. Potenciales beneficiarios de la contaminación atmosférica son, en algunos casos, las cosechas agrícolas, que al ser expuestas a un incremento en las concentraciones marginales de SO_x y NO_x necesitan menos fertilizantes. Estos beneficios, sin embargo, dependen considerablemente de los niveles de la concentración de fondo y son frecuentemente mucho más pequeños que el impacto negativo sobre la salud.

Las funciones exposición-respuesta (F_{ER}) del impacto sobre la salud humana son frecuentemente determinadas por estudios clínicos o epidemiológicos, los cuales relacionan un impacto físico observado o síntoma en la salud, por ejemplo, ingresos hospitalarios por enfermedades respiratorias, con una concentración medida de un contaminante en específico. La concentración de referencia debe ser la exposición personal propia del receptor (la dosis que el receptor recibe). Aunque la dosis personal está fuertemente influenciada por la calidad del aire, es igualmente afectada por otros factores tales como: el tiempo que las personas pasan al aire libre, la relación de concentración dentro y fuera de locales, el nivel de actividad física, la composición del aire contaminado, la dimensión y distribución de especies y la proximidad a la fuente de contaminación. Sin embargo, en la práctica, esta información tan detallada casi nunca está disponible; es por esta razón que para la evaluación de

los impactos se emplean funciones exposición-respuesta, en lugar de funciones dosis-respuesta. En los trabajos más recientes sobre estos temas, para mayor claridad, se ha sustituido el término exposición por concentración, y las funciones se nombran simplemente funciones concentración-respuesta.

Los métodos epidemiológicos utilizados en las tres últimas décadas para el establecimiento y cuantificación de efectos de la contaminación atmosférica en humanos, han tenido como objetivo básico verificar que existe una relación causa-efecto entre el incremento en el nivel de concentración de un contaminante específico y el número de casos o eventos reportados por un punto de salud, dígame un hospital. Aunque la sensibilidad individual a un estímulo externo puede variar considerablemente entre la población, las funciones concentración-respuesta están basadas en los grupos de riesgo. Estos pueden ser niños, adultos, ancianos mayores de 65 años, asmáticos, etc. En el Proyecto ExternE se consideró como adultos a aquellos individuos mayores de 14 años, que representan el 76% de la población total de Europa, donde los niños constituyeron el 24% restante. Las personas asmáticas y mayores de 65 años representaron el 3.5% y el 14% de la población total, respectivamente (Spadaro, 1999).

Una de las más importantes simplificaciones de la Metodología Vías de Impacto es asumir que las funciones concentración-respuesta para la salud humana son funcionalmente lineales, con concentraciones como parámetro independiente sin umbral. Esto significa que no existe ningún valor límite de concentración por debajo del cual el impacto en la salud desaparece (véase la Figura 3).

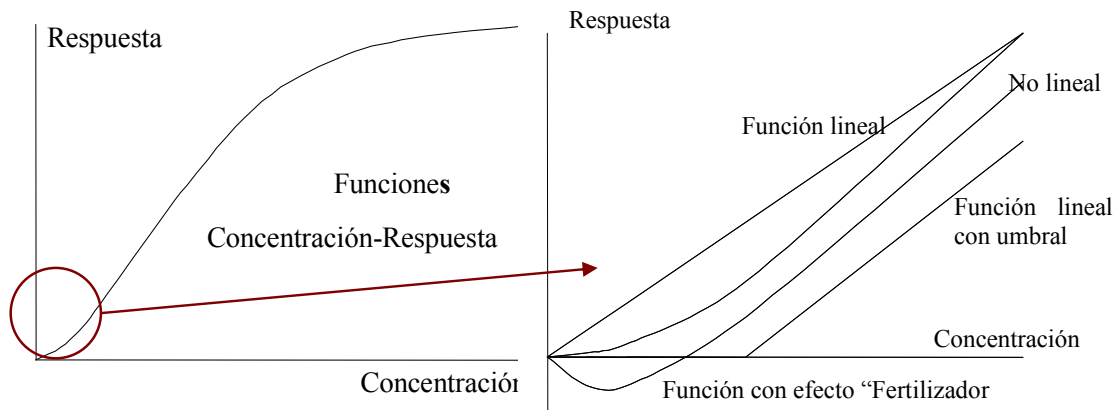


Figura 3: Funciones exposición-respuesta

El impacto de la contaminación atmosférica es calculado por la Metodología Vías de Impacto, de acuerdo con la fórmula presentada en la ecuación [2], para los casos discreto y continuo (Spadaro, 1999).

Caso Discreto	Caso Continuo	[2]
$I = \sum_j N_{rec,j} F_{er}(r_j, C_j(Q))$ <p><i>Sobre todos los receptores</i></p>	$I = \int \rho(r) F_{er}(r, C(r, Q)) dA$ <p><i>Sobre el área de impacto</i></p>	

Donde:

I , impacto estimado (eventos de salud por año),

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

F_{er} , función concentración -respuesta,

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

$\rho(r)$, densidad de los receptores de riesgo en el vector de localización r (personas/ km^2),

A , área de impacto.

Los signos de sumatoria o integración incluyen todos los receptores expuestos a elevados niveles de contaminación y que experimentan consecuentemente sus efectos. Para simplificar, se asumió que el origen del sistema de coordenadas se encuentra en la fuente de contaminación. Generalmente, se puede expresar F_{ER} como el producto del incremento de la concentración y de la pendiente de la relación concentración-respuesta (f_{er}), entonces, $F_{ER}(r, C(r, Q)) = f_{er}(r) \times C(r, Q)$, donde $f_{er} = \partial F_{ER} / \partial C$.

Para la evaluación del impacto en la salud, f_{er} , tiene unidades de casos anuales de enfermedad o muerte por receptor de riesgo por unidad de concentración, (casos/(año-receptor- $\mu\text{g}/\text{m}^3$)). En ocasiones f_{er} se expresa como el Incremento del Riesgo Relativo (IRR), multiplicado por el índice básico de incidencia de dicho impacto en el grupo de riesgo receptor, tal como indica la ecuación [3]. Tanto la pendiente de la F_{ER} como el IRR y el índice básico de incidencia, son números positivos.

$$f_{er} = \text{Incremento}_{-}\text{Riesgo} \left(\frac{\%}{\mu\text{g} / \text{m}^3} \right) * \text{Indice}_{-}\text{básico} \left(\frac{\text{casos}}{\text{receptor} - \text{año}} \right) \quad [3]$$

El incremento del riesgo relativo, es el cambio en la tasa natural de ocurrencia de una enfermedad en particular (para efectos de morbilidad o de mortalidad) en la población expuesta, respecto al índice básico de incidencia por unidad de cambio de la concentración ambiente de un contaminante, típicamente expresado en $\% / \mu\text{g} / \text{m}^3$. El índice básico de incidencia en el grupo de riesgo receptor es la tasa nominal de ocurrencia de una enfermedad particular o de mortalidad en casos anuales por receptor al riesgo (adultos, niños, etc.).

Para impactos de morbilidad, el índice básico de incidencia se obtiene multiplicando el índice básico de incidencia total por la fracción del grupo de riesgo receptor con respecto a la población total.

Los impactos en la mortalidad aguda y crónica son expresados muchas veces en términos de Años de Vida Perdidos (AVP) (en inglés YOLL, *Years of Life Lost*), o reducción en la esperanza de vida, en lugar del número de muertes adicionales o prematuras. En este caso, para obtener el valor del impacto, la pendiente, f_{er} , debe ser multiplicada por los años de vida perdidos en cada caso. Los AVP para muertes agudas varían de pocas semanas hasta uno o dos años; en este estudio, por ejemplo, estamos asumiendo un valor de 0.5 años. Para las muertes crónicas, los AVP dependen de la tasa de mortalidad de los receptores al riesgo. Esta tasa depende fuertemente de condiciones culturales, socio-económicas y médicas de la población analizada. En los Estados Unidos, una muerte crónica implica una reducción en la esperanza de vida de aproximadamente nueve años, mientras que para la población europea, de alrededor de 11 años. Como promedio se asume 10 años.

2.1.4 Cuarto paso: evaluación monetaria

El último paso en el análisis dentro de esta metodología es la evaluación económica de los costos externos de la contaminación atmosférica, según la ecuación siguiente:

$$D = I \times CU \quad [4]$$

Donde:

I , impacto calculado por la ecuación [2],

D , costo externo estimado (ECU o \$ por año),

CU, valor del costo específico por caso (por ejemplo, costo por ataque de asma).

Los costos por caso son frecuentemente determinados por estudios de evaluación contingente, tales como: Voluntad Individual a Pagar (del inglés, *Willingness To Pay*, WTP), con vistas a lograr un beneficio ambiental o Voluntad Individual a Aceptar (del inglés, *Willingness To Accept*, WTA), por un daño medioambiental sufrido. Otras técnicas de evaluación incluyen el uso de esquemas de precios, como métodos indirectos para cuantificar el valor de un bien a través de la variación en el precio de otro. Un ejemplo de esto es determinar el valor de los ecosistemas, sitios históricos y paisajes naturales, considerando los cambios en los ingresos del turismo (Spadaro, 1999).

Para estimar los impactos en la mortalidad, se utiliza fundamentalmente el enfoque de Voluntad a pagar (WTP), ya que se considera que los costos de mercado no representan en su totalidad, el valor económico en la disminución de años de vida. Los costos externos se calculan generalmente considerando una tasa de descuento del 3% sobre el intervalo de tiempo aplicado.

Para estimar los impactos en la mortalidad, se debe calcular primeramente el Valor de un Año de Vida Perdido (*Value of a Life Year Lost*, VLYL), es decir, el valor de un AVP en términos económicos. Para la muerte aguda, el valor VLYL es derivado del Valor Estadístico de la Vida (*Value of Statistical Life*, VSL) usando la ecuación [5] (Spadaro, 1999), para una tasa de descuento dada. En las fases iniciales del proyecto ExternE, se obtuvo un VSL promedio igual a 3.1 millones de ECU₁₉₉₅, o 3.9 millones de dólares estadounidenses, para una tasa de descuento base del 3% ($d_r = 0.03$). Resolviendo la ecuación 5, los VLYL para distintas tasas de descuento, en ECU del año 1995, se muestran en la tabla a continuación:

$$VSL = VLYL_{Agudo} \times \sum_{i=a}^{T_i} \frac{{}_aP_i}{(1 + d_r)^{i-a}} \quad \begin{array}{l} d_r \\ 0\% \\ 3\% \\ 10\% \end{array} \quad \begin{array}{l} VLYL_{Agudo} \\ ECU_{1995} \\ 98\ 000 \\ 155\ 000 \\ 312\ 000 \end{array} \quad [5]$$

Donde:

a , edad del individuo cuyo VLYL es calculado,

${}_aP_i$, probabilidad 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.

El análisis de la mortalidad crónica es muy diferente al de la mortalidad aguda, pues la muerte no se produce inmediatamente después de la exposición inicial sino muchos años después. Así, la ecuación debe ser modificada para tener en cuenta los efectos de acumulación o de exposición prolongada antes de morir. En los estudios de ExternE, esto fue hecho calculando un estimado del VLYL “pesado”. La premisa fundamental es que el riesgo total de muerte está uniformemente distribuido en un periodo de 30 años (en otras palabras, cada año contribuyó 1/30 del impacto cuantificado). El valor de VLYL para casos de mortalidad crónica fue calculado usando la ecuación [6] (Spadaro, 1999).

$$VLYL_{Crónico} = \sum_{i=1}^{70} \frac{AVP_i}{AVP_{TOT}} \times \frac{VLYL_{Agudo}}{(1 + d_r)^{i-1}} \quad \begin{array}{l} d_r \\ \% \\ 3\% \\ 10\% \end{array} \quad \begin{array}{l} VLYL_{Crónico} \\ ECU_{1995} \\ 98\ 000 \\ 84\ 330 \\ 60\ 340 \end{array} \quad [6]$$

Donde:

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

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

Para el AVP crónico, solamente las personas por encima de 30 años son consideradas de riesgo, y constituyen el 60% de la población, 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). Como se mencionó anteriormente, para Europa y los Estados Unidos se estimaron alrededor de 11 y 9 AVP, respectivamente, por cada muerte crónica relacionada con la contaminación atmosférica. Estudios posteriores del proyecto ExternE obtuvieron nuevos resultados, con menores VSL (1 500 000 US\$₂₀₀₀, para 3% de tasa de descuento), y en consecuencia, de los VLYL agudos y crónicos (174 000 y 101 000 US\$₂₀₀₀, respectivamente).

2.2 Criterios para la selección de funciones exposición-repuesta a partir de estudios epidemiológicos

2.2.1 Los estudios epidemiológicos

Los contaminantes atmosféricos son capaces de ejercer una amplia gama de efectos adversos sobre la salud humana, los que de ningún modo son excluyentes entre sí; estos pueden ser agudos, y más frecuentemente, crónicos. Entre los efectos se puede mencionar: la disminución del flujo de aire en las vías respiratorias a nivel subclínico en los niños y en la población general [Brunekreef et al (1993)² y Schindler (1998)³]; deterioro del rendimiento físico aún en personas sanas (WHO, 1997)⁴; irritación de las mucosas oculares y del tracto respiratorio superior; aumento de la frecuencia de síntomas respiratorios altos y bajos; disminución de la resistencia a las infecciones del aparato respiratorio; deterioro de la función pulmonar en los niños y en la población sana (OPS, 2000)⁵; 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, aún después de ser controlado el hábito de fumar y la exposición ocupacional (Molina et al, 1996)⁶.

Comúnmente las relaciones entre ambiente y salud, salvo casos excepcionales de emergencias ambientales agudas, caracterizadas por la exposición intensa a agentes peligrosos, son complejas y difíciles de evaluar (OPS, 2000). Es por ello que históricamente, los efectos agudos, ocasionados por exposiciones relativamente breves a concentraciones elevadas de contaminantes del aire, han sido objeto de mayor publicidad, a pesar de que los mismos ocurren con una frecuencia cada vez menor, generalmente a consecuencia del predominio de condiciones meteorológicas excepcionalmente adversas para la dispersión de estos agentes en la atmósfera o por la súbita liberación de los mismos por accidentes tecnológicos (WHO, 1992)⁷.

Se dispone de un menor nivel de conocimiento respecto a las consecuencias de la exposición cotidiana, durante largos períodos, a concentraciones relativamente bajas de contaminantes. A ello contribuyen múltiples factores, tales como: la falta de especificidad y origen multicausal de la mayoría de los efectos que estos agentes pueden ocasionar; el prolongado período de latencia de muchas de estas afecciones; la falta de registros históricos continuos y confiables de monitoreo ambiental; la diversidad de ambientes en que las personas desarrollan sus actividades a diario; la exposición simultánea a otros factores de riesgo, tales como el tabaquismo, la contaminación del aire interior en las viviendas y en los puestos de trabajo, así como otros determinantes del estado de salud vinculados a las condiciones de vida de origen socioeconómico. El efecto de las migraciones también puede hacer difícil la evaluación retrospectiva de las exposiciones y por tanto la medición de las relaciones dosis-repuesta para muchos de los efectos crónicos asociados (Koren, 1995)⁸.

Bajo las condiciones habituales de exposición observadas en la población general, la contaminación atmosférica se comporta como un factor de riesgo de baja intensidad aparente, caracterizado por asociaciones débiles para cada uno de los efectos asociados a la misma, con riesgos

relativos ³ que solo superan ligeramente a la unidad. Sin embargo, debido a la elevada frecuencia (incidencia o prevalencia) de cada uno de estos efectos, puede dar lugar a riesgos atribuibles de importante magnitud, los que sumados constituyen grandes cargas, en términos de pérdida de calidad de vida, morbilidad aguda y crónica, invalidez y mortalidad precoces, con el consiguiente costo económico para el paciente, la familia, los servicios de salud y la sociedad en general (Ostro, 1996)⁹.

En los últimos años diversos estudios han reportado que niveles de exposición ambiental hasta hace poco considerados como inocuos, son capaces de ocasionar efectos adversos sobre la salud de la población general, y en particular de los grupos más susceptibles, tales como niños pequeños, asmáticos, enfermos crónicos y ancianos, sin que se reconozcan umbrales precisos de respuesta para diferentes contaminantes (Goldsmith et al, 1996)¹⁰. La Organización Mundial de la Salud (OMS) y sus oficinas regionales han establecido valores guía para la gran mayoría de los contaminantes del aire, prioritarios en zonas urbanas, basados en las evidencias más actualizadas disponibles a partir de estudios toxicológicos, clínicos y epidemiológicos (CETESB, 2000)¹¹.

De acuerdo con lo anterior, los estudios epidemiológicos analíticos dirigidos a evaluar el impacto de contaminantes atmosféricos en la población general se encuentran entre los más difíciles de diseñar y evaluar, a la vez que requieren de una cuidadosa interpretación. Deben poseer, entre otros atributos, una elevada sensibilidad, lo que hace necesario el empleo de grandes muestras en los diseños cuya unidad de análisis es el individuo. La identificación y control de sesgos y de potenciales factores de confusión o modificación de los efectos deben tenerse en cuenta en todas las etapas del estudio (OPS, 1994)¹².

El análisis de estudios epidemiológicos con el objetivo de identificar posibles funciones exposición–respuesta entre agentes peligrosos y efectos sobre la salud puede realizarse mediante diferentes métodos, tales como, la integración de los datos obtenidos en otros estudios por la vía del “meta-análisis”⁴, el empleo de los resultados individuales de diferentes estudios o la combinación de los datos originales. Deben incluirse en el informe las estimaciones estadísticas y demás posibles fuentes de incertidumbre en la determinación de las funciones resultantes; en especial se especificará 1) el enfoque asumido para obtener la frecuencia de ocurrencia del efecto en salud objeto de análisis y 2) los métodos empleados para estimar el número de casos atribuibles (Ralb, 2002).

2.2.2 Metodología para la selección y análisis de estudios epidemiológicos

Cuando se analizan estudios epidemiológicos para la selección de las F_{ER} , se debe evaluar el cumplimiento de los principales requerimientos básicos para el establecimiento de dichas funciones, según los criterios actualizados (Ralb, 2002) y en especial del documento guía de la OMS tomado como referencia principal (WHO, 2000)¹³. Estos son: i) la calidad de la medición de la exposición a los contaminantes del aire; ii) la correspondencia de las unidades de medida y rangos de exposición con las disponibles para la población en la que se pretende evaluar el impacto en salud, y iii) el grado de generalización de las mediciones de los efectos sobre la salud a otras poblaciones, debido a la presencia de factores locales que pudieran actuar a nivel local, como confusores o modificadores, tales como factores socioeconómicos o la presencia de grupos de elevada susceptibilidad.

Al conferir peso a la evidencia epidemiológica aportada por cada estudio, se deben considerar los siguientes aspectos para evaluar los estudios que cumplan con los requerimientos básicos (WHO, 1999)¹⁴:

³ Riesgo relativo es la relación entre la tasa de ocurrencia de un efecto dado para una población expuesta y la tasa de ocurrencia de este efecto para una población no expuesta.

⁴ El meta análisis es un tipo particular de revisión de estudios epidemiológicos, se le conoce también como "análisis de análisis". Se trata de un conjunto de procedimientos estadísticos que combinan los resultados de varios estudios independientes, considerados combinables, con el propósito de integrarlos en un resultado global.

- a) Racionalidad del estudio: ¿constituye un paso lógico en la solución del problema?
- b) Hipótesis y objetivos: ¿claros y precisos? ¿corresponden con los resultados que se pretende obtener?
- c) Metodología: tipo de diseño; población en riesgo; método de selección y tamaño de la muestra; criterios de selección y exclusión, tanto de la población en estudio como de los grupos de referencia o control; medición de la exposición y de los efectos sobre la salud; tratamiento y control de las posibles variables de confusión o modificadoras; evidencia de sesgos de información; análisis estadístico; señalamiento de limitaciones.
- d) Resultados: principales hallazgos (negativos o positivos); datos faltantes; control de factores de confusión.
- e) Discusión y conclusiones: validez interna; validez externa; consistencia con otros estudios; importancia práctica de los resultados.

2.2.3 Criterios generales para la selección de las F_{ER} en las evaluaciones de externalidades

Anteriormente se mostró los requerimientos básicos y los aspectos a considerar en las evaluaciones de estudios epidemiológicos para la selección de las funciones. Posterior a este paso, en que se han identificado un número de estudios que cumplen los requisitos, se debe pasar a la etapa de selección del conjunto de F_{ER} a utilizar en los estudios de evaluaciones de impacto ambiental. Dicho conjunto debe cumplir los requerimientos generales siguientes:

- a) Funciones creíbles: cada función debe mostrar asociación real y probada de un efecto de la contaminación atmosférica en la salud humana.
- b) Confiabilidad individual de cada función: dado por un apropiado análisis del estudio epidemiológico de donde provienen.
- c) Trasferibles/generalizables: deben provenir de estudios que se desarrollaron bajo condiciones similares a las condiciones del lugar o región donde se propone su aplicación.
- d) Para ser empleada en un proyecto de evaluación de externalidades deben cumplir además lo siguiente:
 - i) Efectos que puedan ser evaluados monetariamente.
 - ii) Funciones puedan ser fácilmente implementada (por ejemplo, linealizadas independientemente de los niveles de fondo).

2.2.4 Asumiciones básicas de las F_{ER} en las evaluaciones de externalidades

En las evaluaciones de externalidades generalmente se asume que las F_{ER} son funciones lineales o muy próximas a la linealidad, sin umbral, tal como actualmente propugnan numerosos autores de acuerdo con los resultados de diferentes estudios relevantes recientes [Dockery (1993)¹⁵, Pope (1995)¹⁶, Ostro (OMS, 1996), Zmirou (1997)¹⁷, Health Effects Institute (2003)¹⁸]. De igual modo se toman las concentraciones de los contaminantes como parámetro independiente, siendo la pendiente de la F_{ER} la misma dentro del rango de exposiciones comúnmente observadas, sin que exista un valor de concentración preciso por debajo del cual el impacto en la salud desaparece (European Commission, 1995)¹⁹.

Las pendientes de las F_{ER} pueden ser determinadas siguiendo los criterios metodológicos propuestos por Ostro (OMS, 1996) y Ralb (2002), de modo que pueden ser utilizados con este objetivo en cualquier otro estudio que cumpla con los requisitos necesarios y aporte la información pertinente. Igualmente permiten realizar estimaciones de riesgo o evaluaciones de impacto en salud mediante la aplicación de las F_{ER} obtenidas en otros considerados de relevancia, conjuntamente con la inclusión de la información demográfica, la incidencia o prevalencia de los efectos evaluados, y los niveles de exposición a los diferentes contaminantes propios de un grupo poblacional en un territorio o país,

transfiriendo solamente las relaciones entre la variación de la ocurrencia del efecto en función de las concentraciones del agente. Esto es, la pendiente de la función concentración-repuesta, f_{er} , vendría expresada por la ecuación [7].

$$f_{er} = (IRR) I_{ref} F_{pop} \quad [7]$$

Donde:

IRR: es el % de incremento del RR por $\mu\text{g}/\text{m}^3$, obtenido de los diferentes estudios epidemiológicos.

I_{ref} : es la tasa de incidencia base, tiene como unidades los casos por persona al año (tasa de referencia).

F_{pop} : es la fracción de la población afectada.

Por lo tanto, utilizando el valor de pendiente obtenido en la ecuación [7], los casos anuales se podrán expresar de la siguiente forma (ecuación 8):

$$I = f_{er} (POP_j) (\Delta C_j) \quad [8]$$

Donde:

I: # de casos anuales

POP_j , es el número de receptores en la localización j .

ΔC_j , es el cambio anual en las concentraciones de un contaminante dado en el área j .

2.3 Metodología Simplificada: Modelo SIMPACTS de la OIEA

Diferentes modelos detallados han sido creados para estimar las externalidades, siguiendo la Metodología de Vías de Impacto, como por ejemplo el modelo Ecosense⁵ utilizado en el proyecto ExternE. Sin embargo, los altos requerimientos de información de estos modelos impulsaron a la Agencia Internacional de Energía Atómica a elaborar una metodología simplificada, mediante el modelo SIMPACTS. Este consiste en tres módulos principales: AIRPACTS, NUKPACTS e HYDROPACTS. El primero estima los impactos en la salud humana, las cosechas agrícolas y los materiales, debido a la exposición a las emisiones atmosféricas. Los otros dos módulos analizan los impactos de las centrales nucleares e hidroeléctricas, respectivamente. En el proyecto solo se utilizó el primero, y restringido a la parte de impacto en la salud humana, por ser el más significativo.

Para evaluar los impactos en la salud, AIRPACTS incluye varios modelos que representan diferentes niveles de acercamiento analítico al problema en cuestión:

1. Modelo Simplificado Mejorado. En inglés *Robust Uniform World Model (RUWM)*. Con tres versiones: Estimaciones Básica, Media y Superior.
2. Modelo para la estimación de los impactos en la salud. En Inglés *QUick Estimation of Respiratory health Impacts (QUERI)*. Con tres versiones: Estimaciones Básica, Media y Superior.
3. Modelo para ambientes urbanos (*URBAN*). Con dos versiones: Estimaciones Básica y Superior.

El punto de partida de estos tres modelos es el Modelo Simplificado Básico. En inglés *Simple Uniform World Model (SUWM)*. Los Modelos Simplificados Básico y Mejorado son soluciones aproximadas de la función de evaluación de impacto (véase ecuación 2) en los que uno o más parámetros son asumidos uniformes o constantes a través del dominio de impacto.

⁵ Programa desarrollado por el Instituto para Estudios Económicos y Uso Eficiente de la Energía (IER) de la Universidad de Stuttgart (Alemania)

En el SUWM, la densidad de población, los parámetros de dispersión atmosférica, en particular la tasa de remoción de un contaminante en el aire, y las funciones exposición-respuesta, son tratados como constantes e independientes de los parámetros de la fuente y de su localización. En el RUWM se toma ya en consideración los parámetros reales de la fuente (en particular la altura de la chimenea y el flujo de gases), así como la distribución de población local, mediante un tratamiento matemático más riguroso, pero aún simplificado.

A diferencia del RUWM, el QUERI es un modelo semi-empírico. Su punto de partida es la ecuación de impacto del SUWM, modificada con diferentes factores de corrección, determinados en base a los resultados de análisis hechos con modelos detallados de la Metodología Vías de Impacto, en algunas localizaciones en Europa, con diferentes características de la fuente emisora.

Por su parte, el modelo URBAN estima los impactos en la salud y los costos respectivos resultantes de los contaminantes primarios y secundarios emitidos desde una fuente situada en un ambiente urbano o muy cerca de él.

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

Entre las Metodologías Simplificadas disponibles, el modelo que más se asemeja a los modelos detallados y que debe proporcionar resultados más exactos es la Estimación Superior del QUERI, ya que ninguno de los otros modelos considera la distribución de la población local en detalle, en una resolución de 5 x 5 km, así como los datos meteorológicos horarios para un año de referencia y todos los parámetros de la fuente emisora.

El impacto local de los contaminantes primarios en el QUERI es calculado mediante un modelo de dispersión Gaussiano, el Industrial Source Complex Long Term Model (ISCLT2), de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, Environmental Protection Agency) de los Estados Unidos. Sin embargo, para estimar el impacto regional no utiliza ningún modelo de dispersión regional, más bien aplica la fórmula simplificada del modelo básico SUWM. Esta se basa en la velocidad de decaimiento de los contaminantes, la cual se estima mediante modelos de simulación o por el tiempo de residencia de los contaminantes en la atmósfera. La metodología del SIMPACTS recomienda valores de velocidad de decaimiento para los diferentes contaminantes, en los casos que no se cuente con dicha información para la zona de estudio. El modelo QUERI calcula los efectos locales debido a los contaminantes primarios, así como los efectos secundarios, por contaminantes primarios y secundarios⁶. Estudios comparativos realizados con los resultados del modelo detallado y del QUERI en varias localidades europeas reportan desviaciones en un rango de $\pm 30\%$ (Spadaro 1999).

La Tabla 2 resume los datos necesarios para cada una de las metodologías simplificadas descritas anteriormente, en lo relacionado con la fuente de emisión, los datos meteorológicos y los datos de los receptores. Dependiendo de la disponibilidad de los datos en cada caso, el modelo SIMPACTS escoge automáticamente la versión más completa del modelo seleccionado.

Conviene mencionar que el modelo SIMPACTS no incluye ningún módulo para cálculo de emisiones, así que deben medirse o calcularse con otras metodologías, como la del IPCC, usando factores típicos, etc., para cada punto de emisión.

⁶ Véase de nuevo, Turtos L, 2003

Para cada caso de estudio se deben usar los datos meteorológicos de la estación más cercana, con condiciones geográficas y físicas similares, recomendadas por el Servicio Meteorológico Nacional. En lo posible, conviene utilizar metodologías nacionales para el cálculo de las variables meteorológicas secundarias como la estabilidad atmosférica y las alturas de la mezcla urbana y rural, aunque el SIMPACTS incluye módulos de cálculo por defecto.

Asimismo se requieren los datos de población, ya sea densidades regionales, locales o distribución, en una resolución de 5x5 km. Para ello se puede usar un Sistema de Información Geográfica (SIG), con capas de población actualizadas al menos hasta los términos municipales.

Con respecto a las F_{ER} , lo óptimo es contar con funciones propias del territorio donde se lleva a cabo el estudio de externalidades. Al nivel internacional se han ejecutado un número muy reducido de estudios epidemiológicos destinados a definir estas funciones, por su alto costo. Por ello, se debe tratar de usar toda la información local y compararla con los estudios internacionales, compatibilizando los resultados, a fin de definir las funciones que se utilizarán en el cálculo de los impactos en el sitio seleccionado.

Es conveniente también conocer la distribución de la población por grupos de riesgo, ya que algunas F_{ER} están referidas a estos grupos y no a la población en general: niños, adultos, ancianos, asmáticos, adultos mayores de 30 años. También sería conveniente disponer de los índices básicos de mortalidad y de incidencia de las enfermedades más relacionadas con la contaminación atmosférica, para el caso de que se decidan usar F_{ER} donde se conozca el incremento del riesgo, tal como se explicó anteriormente.

Tabla 2: Datos de entrada requeridos por las diferentes versiones del modelo AIRPACTS

Parámetros	SUWM	RUWM		QUERI	URBAN
		Media	Superior		
	Dominio Regional				
Densidad regional de los receptores	✓	✓	✓	✓	✓
	Dominio Local: Datos de la fuente				
Ubicación (Longitud y latitud)		✓	✓	✓	✓
Zona horaria				✓	✓
Altura de la chimenea		✓		✓	✓
Diámetro de la chimenea		✓		✓	✓
Temperatura de los gases de escape		✓	+	+	✓
Velocidad de los gases de escape		✓	+	+	✓
Tasa de Emisión	✓	✓	✓	✓	✓
	Dominio Local: Datos meteorológicos				
Velocidad media del viento		✓			✓
Temperatura ambiente media		✓			✓
Estadísticas de estabilidad atmosférica		✓			✓
Datos meteorológicos horarios ⁷		•		✓	•
Altura del anemómetro				✓	
	Dominio Local: Datos de los receptores				
Localización Urbana o Rural		✓	✓	✓	Zonas

⁷ Velocidad y dirección del viento, temperatura ambiente, categoría de estabilidad atmosférica, altura de la mezcla urbana y rural, exponente de perfil de viento y gradiente potencial vertical de temperatura.

Parámetros	SUWM	RUWM		Básica	QUERI		URBAN urbanas
		Media	Superior		Media	Superior	
Densidad local de los receptores		✓	✓	‡	✓		
Distribución de los receptores		†	†	†	†	✓	✓

✓ Dato imprescindible

• Puede ser sustituido por los valores medios estadísticos

‡ Si se conoce, los resultados son más exactos

† Puede ser sustituido por la densidad local de los receptores

Para determinar los costos del impacto, en ausencia de estimaciones nacionales, se pueden utilizar los costos reportados por el Proyecto ExternE para la Unión Europea (Costos_UE) o los de otros estudios internacionales, y transferirlos a las condiciones nacionales (Costos _ Nacionales), de acuerdo con:

$$\text{Costos_Nacionales} = \text{Costo_UE} * R_{ajt}, \text{ US\$}/\text{casos} \quad [9]$$

Donde, R_{ajt} es un factor de ajuste. Existen diferentes criterios para determinar R_{ajt} , como los siguientes:

a) $R_{ajt} = (PPP_PNBp_Nacional / PPP_PNBp_UE)^E$, donde PPP_PNBp es la paridad del poder adquisitivo del $PNBp$ para el año de referencia en el país donde se hace el estudio y en los países de la Unión Europea o Estados Unidos donde se realizó el estudio cuyos resultados se están transfiriendo.

b) $R_{ajt} = (PIBp_Nacional / PIBp_UE)^E$, donde, $PIBp$ es el Producto Interno Bruto per cápita (USD/personas).

c) $R_{ajt} = 1$, si fuera posible que los pueblos valoraran sus condiciones de salud exactamente igual que la Unión Europea.

En los dos últimos casos E es un coeficiente de elasticidad, en función de condiciones nacionales que permitan valorar más o menos la salud y los impactos ambientales, independientemente del poder adquisitivo. Generalmente se le dan valores de 0.35 a 1.

2.3.1 Consideraciones realizadas para la implementación de las metodologías simplificadas en Costa Rica

Debido a las condiciones geográficas de Costa Rica (terrenos con topografía compleja para la mayor parte del territorio) y a las características de las fuentes emisoras seleccionadas (fuentes con chimeneas bajas y volúmenes de emisiones bajos en comparación con las grandes centrales térmicas para las que fue diseñado el AIRPACTS) se decidió usar la metodología del AIRPACTS (en particular la mejor estimación del modelo QUERI) aunque no el modelo de cálculo pues a pesar de las modificaciones realizadas (Ver ANEXO III: AIRPACTS) este no satisfizo todos los requerimientos.

Para evaluar la dispersión local de los contaminantes (y consecuentemente su impacto local, $I_{P|Local}$), en lugar de usar el ISCLT en sus opciones básicas, tal y como está considerado en AIRPACTS, se utilizó el ISCST3 considerando en todos los casos la topografía del terreno. La rejilla del AIRPACTS de 100 x 100 km centrada en la fuente con celdas de 5 x 5 km fue sustituida por un reticulado de 10 x 10 km con celdas de 500 x 500 m (400 celdas), salvo para la refinería donde el dominio se extendió a 15 x 15 km, manteniéndose el tamaño de las celdas en 500 x 500 m (900 receptores o celdas).

Para el impacto regional ($I_{P|Regional}$) se utilizó exactamente la metodología propuesta en QUERI para los contaminantes primarios. A solicitud de las autoridades de Costa Rica involucradas en el proyecto no se estudiaron en esta primera etapa los contaminantes secundarios.

$$I = I_{P|Local} + I_{P|Reg} + I_{S|Reg} \quad [10]$$

$$I_{P|Local} = \sum_{j=1}^{No_celdas} N_{recep_j} f_{ER} C_j \quad [11]$$

$$I_{P|Reg} = I_{P|SUWM} e^{-\frac{k}{u_{Reg} h_{mix}}} Ro \quad [12]$$

$$I_{P|SUWM} = I_{S|Reg} = \frac{\rho_{Reg} f_{ER} Q}{k} \quad [13]$$

Donde:

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

f_{ER} , pendiente de la función exposición-respuesta,

C_j , cambio incremental en la concentración de fondo en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para una tasa de emisión Q en la celda j ,

ρ , densidad de los receptores de riesgo, personas/ km^2 ,

k , velocidad de decaimiento del contaminante área de impacto.

u_{Reg} y h_{mix} , velocidad del viento y altura de la capa de mezcla promedio en el dominio regional (3.8 m/seg y 800 m respectivamente)

Ro , Radio del domino local considerado (5.6 y 8.5 km para las rejillas de 10 x 10 km y 15 x 15 km respectivamente)

Tantos los impactos como los costos se presentan en un rango de confiabilidad. La estructura de la Metodología de Vías de Impacto es esencialmente un proceso de multiplicación que involucra cuatro variables independientes: concentración incremental de contaminantes, F_{ER} , densidad del receptor y costo monetario. Para semejante función, que involucra varias variables distribuidas independientes y aleatorias, según el Teorema del Límite Central en estadísticas, la distribución natural es log-normal, caracterizada por un valor medio (μ_g) y una desviación geométrica estándar (σ_g). Es decir, el logaritmo natural de la función de daño tiene una distribución Normal o Gaussiana. Los intervalos de confiabilidad de 68% y 95% se definen como indican las expresiones siguientes:

Intervalo de confiabilidad **68%**

$$[\mu_g / \sigma_g; \mu_g * \sigma_g]$$

Intervalo de confiabilidad **95%**

$$. [\mu_g / \sigma_g^2; \mu_g * \sigma_g^2]$$

Para evaluar los valores mínimo y máximo del intervalo de confiabilidad de 68% simplemente se divide y se multiplica el valor estimado por σ_g respectivamente, mientras que para el de 95% se divide y multiplica dicho valor por σ_g^2 . SIMPACTS usa un intervalo de confianza del 68% con los siguientes valores de σ_g de acuerdo al impacto de que se trate.

Tipo de impacto	σ_g
Morbilidad	3
Mortalidad aguda	6
Mortalidad crónica	4
Cáncer	6

3 DATOS PARA LOS MODELOS UTILIZADOS

La aplicación de la Metodología de Vías de Impacto mediante la metodología del AIRPACTS para la evaluación de externalidades de fuentes fijas en Costa Rica requirió una serie de datos técnicos, económicos y de salud, proveniente de las instancias oficiales involucradas. En total se analizaron 6 casos, algunos de ellos con múltiples fuentes.

3.1 Datos de las fuentes emisoras

Para cada una de los casos de estudio se recopiló información de tipo geográfico, como la ubicación de las fuentes (longitud y latitud y elevación de la base sobre el nivel del mar), población local, población regional, la distribución local de población en una resolución de 500 x 500 m en un dominio de 10 x 10 km ó 15 x 15 km, ó de 5 x 5 km en un dominio de 100 x 100 km según el caso en cuestión y la elevación del punto central de cada una de las celdas (véase Tabla 1). Estos datos fueron suministrados por especialistas de RECOPE. Con respecto a la densidad de población regional en un radio de 1000 Km, utilizando los últimos datos globales disponibles (1994), resultó de alrededor de 10 habitantes/km². Sin embargo en Costa Rica ha habido un incremento de un 20% en la población de 1994 al 2000. Si aplicamos ese 20% al factor regional resulta en 12 habitantes/km².

Con respecto a los datos técnicos de las fuentes emisoras en lo que respecta al tipo de combustible y tecnología, así como los datos técnicos de las chimeneas (número, altura, diámetro interior, velocidad y temperatura de salida de los gases) e incluyendo las propias emisiones se obtuvieron generalmente de los formularios “RESULTADOS DE ANÁLISIS QUÍMICOS DE EMISIONES AL AIRE” y “Reporte operacional para fuentes fijas de emisión”, suministrados por la Dirección de Protección Ambiental del Ministerio de Salud de Costa Rica (véase Tabla 3). [Para el caso de la refinería y la planta térmica de Limón, las emisiones fueron calculadas por especialistas de RECOPE.](#)

La mayoría de fuentes evaluadas utilizan Bunker, con un contenido de azufre aproximado del 2%, una fuente quema cascarilla de café y leña. En general el nivel de emisiones es bajo en comparación con las grandes centrales termoeléctricas, muy frecuente a encontrar en otros países. Se evaluaron las emisiones de PM₁₀, SO₂ y NOx. [La Figura 4 muestra las emisiones anuales de estos contaminantes considerados en los cálculos para cada una de las instalaciones.](#)

[En todos los casos las emisiones instantáneas en g/seg utilizadas en la modelación se calcularon a partir de los reportes antes mencionados teniendo en cuenta el régimen de operación más probable para la caldera en cuestión con el objetivo de obtener concentraciones promedios anuales lo más representativas posible.](#) Esto quiere decir que pueden presentarse condiciones en períodos cortos (1h, 24 h, etc.) donde las concentraciones superen los valores calculados, cuando la instalación esté trabajando a plena capacidad

Las emisiones de PM₁₀ se calcularon a partir de las emisiones de material particulado total utilizando la distribución del tamaño de las partículas propuesta por la AP-42 de la EPA (86 % del total para Bunker en caldera industriales y el 90% para residuos de madera)

Tabla 3: Principales características de las fuentes evaluadas

Calderas	Lado del Dominio	Lado de las celdas		Chimenea		Gases de escape		Emisiones (g/seg)			Régimen de operación	Densidad local	Ambiente
	km	km	Combustible	Altura	Diámetro int.	Temp.	Velocidad	PM10	SO ₂	NO _x		Hab./km ²	
				m	m	K	m/seg						
El Alto de Ochomogo	10	0.5	Bunker									1192	Urbano
Caldera 1258				5.7	0.27	482.00	11.01	0.007	0.27	0.03	Alternó		
Caldera 414				10	0.74	563.33	5.67	0.161	4.42	0.55	24 horas		
Caldera 1401				10	0.45	493.67	10.53	0.047	1.09	0.16	Alternó		
Moin Refinería RECOPE	15	0.5	Bunker	Ver Tabla 12: Datos utilizados en la modelación de la Refinería							24 horas	304	Rural
Fabrica Nacional Licores	10	0.5	Bunker	10	0.58	503	7	0.17	3.14	0.78	70%	297	Rural
Punto Rojo	10	0.5	Bunker									1590	Urbano
Caldera 763				16.2	0.57	441	6.12	0.097	2.65	0.52	12 horas		
Caldera 1083				16.2	0.58	427	4.88	0.072	2.23	0.33	12 horas		
Planta Térmica MOIN	100	5	Bunker				11.55	10.9	14.72	63.42	2000 h/año	296	Rural
Beneficio Cooppro-Naranja	10	0.5	Cascarilla y leña	5.19	0.7	438	5.19	0.24	0.08	0.61	2 horas	374	Rural

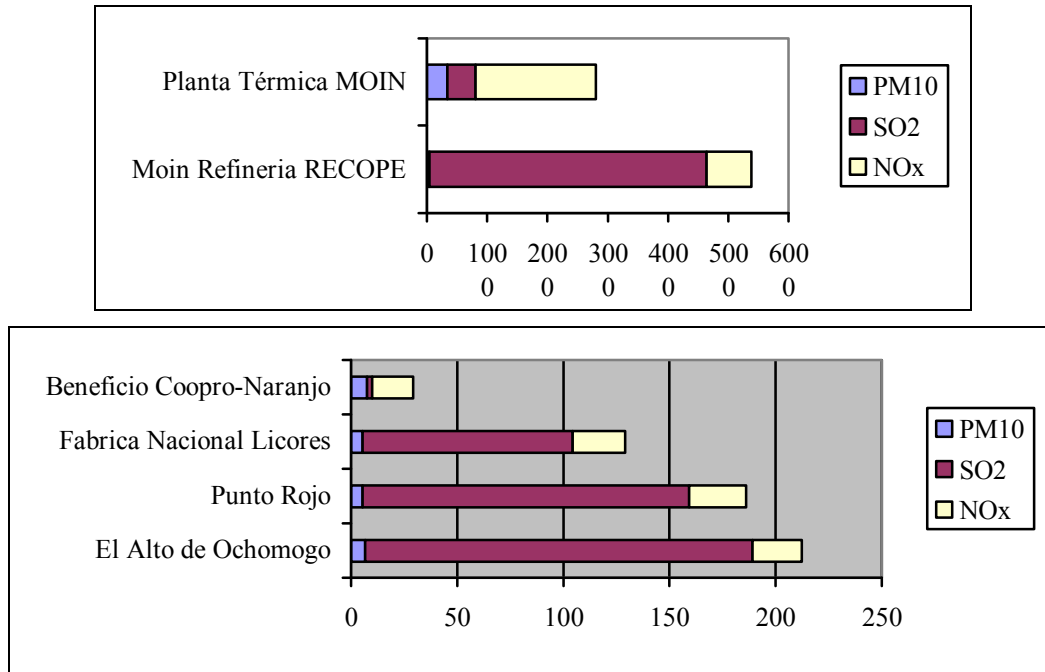


Figura 4: Emisiones anuales de PM₁₀, SO₂ y NO_x consideradas en los cálculos

3.2 Dispersión de las emisiones de contaminantes

3.2.1 Modelo de dispersión utilizado

El modelo de dispersión local utilizado en cinco casos de estudio fue el ISCST3 de la EPA, en lugar del ISCLT incluido en el modelo QUERI del módulo AIRPACTS por las razones antes explicadas. Este modelo de dispersión permite calcular el promedio anual del contaminante en estudio en cada punto receptor, necesario para la evaluación de las Externalidades, y también las concentraciones en otros períodos de promediación, para estudios de calidad del aire. Para poder realizar comparaciones con los valores normados en Costa Rica, en el estudio se realizaron los cálculos también para 24 horas. El modelo se corrió teniendo en cuenta la topografía del terreno. También permite modelar la deposición seca y húmeda de los contaminantes, pero estas opciones no se utilizaron por requerir datos adicionales que no están disponibles por el momento (datos de sondeo para el cálculo de la altura de la capa de mezcla y datos de nubosidad o radiación para la estimación de las categorías de estabilidad atmosférica, que a su vez permiten calcular la longitud de Monin-Obukhov, la velocidad de fricción y la altura de la capa de mezcla horaria).

Algunas consideraciones de índole práctico para considerar la topografía del terreno:

- Para la palabra clave LOCATION, el parámetro Zs corresponde a la altura de la base de la chimenea sobre el nivel del mar. El parámetro Zelev de las palabras claves que identifican la ubicación de los receptores, corresponde a la altura de los receptores sobre el nivel del mar. Entonces:
 - si Zs≠0, Zelev no es la diferencia de altura entre la base de la chimenea y el receptor,
 - Zelev puede ser negativa
- Por defecto el programa calcula las concentraciones a nivel del terreno. Para calcular las concentraciones a 1.5 m (altura promedio a la que las personas respiran), se debe indicar CO FLAGPOLE 1.5 dentro de las opciones de control.

Conviene mencionar que el ISCST puede simular varios puntos diferentes de emisión (chimeneas) cercanos en forma simultánea lo que permitió de forma relativamente sencilla evaluar varias fuentes de una misma industria. La antorcha de la Refinería se modeló también con el ISCST3 utilizando la metodología simplificada propuesta en EPA, 1995a²⁰, que se detalla en la Sección 4.2.1 dedicada a las evaluaciones en la Refinería.

Finalmente, la modificación realizada al AIRPACTS a fin de incluir la opción de poder tomar los datos de dispersión de un modelo exógeno no fue utilizada pues la rejilla de este modelo no se adapta a las condiciones de Costa Rica y no se ha logrado una versión del AIRPACTS que permita seleccionar la rejilla a utilizar. En ninguna de las zonas estudiadas se utilizaron modelos de dispersión regional, por lo que se aceptaron las aproximaciones del modelo QUERI explicadas anteriormente.

3.2.2 *Datos meteorológicos*

De acuerdo a las limitaciones en la disponibilidad de datos meteorológicos se realizaron las siguientes consideraciones para usar el modelo ISCST3.

- Determinación de la estabilidad atmosférica y la altura de la capa de mezcla por las metodologías simplificadas (Ver ANEXO IV) utilizando el programa meteo.exe con el siguiente flujo de datos: raw.dat (fichero meteorológico de entrada del AIRPACTS-ISCLT sin estabilidad ni altura de la capa de mezcla) + input.dat (Latitud, Longitud y meridiano de la zona horaria) / METEO.EXE / meteo.dat (fichero meteorológico de entrada del ISCST). Agregar primer registro con código de la estación de superficie, año, código de estación de datos de altura, año
- Para usar el mismo fichero que para el ISCLT, dentro de las opciones meteorológicas agregar: ME WDROTATE 180

Como no se usó el PCRAMMET para pre-procesar los datos meteorológicos, como se explicó anteriormente, y teniendo en cuenta los criterios usados para identificar las calmas en el fichero de datos meteorológico, se modificó en el código fuente del ISCST, el valor de umbral de velocidad del viento que define dicha condición de 0 a 1 m/seg.

3.2.2.1 Consideraciones realizadas en los ficheros de datos meteorológicos:

- Modeladas todos los casos con los tres años de datos meteorológicos disponibles (1999, 2000, 2001)
- Sustituida las horas del formato 100-2400 a 1-24
- Sustituida la dirección del viento considerada como variable (9) a faltante (-9)
- Aunque se evaluó la posibilidad de sustituir los datos faltantes y dirección de viento variable por el valor más probable de la dirección del viento para la estación en cuestión, (Ej: Limón: 225, Ochomogo: 135); la velocidad del viento faltante (-9) por el valor medio de la velocidad del viento (Ej: Limón: 1.9, Ochomogo: 3.8) y la temperatura ambiente faltante (-9) por el valor medio de la temperatura (Ej: Limón: 299 °K, Ochomogo: 290 °K), finalmente se decidió permitir la opción de datos faltantes en el fichero de datos meteorológicos de entrada al ISCST (parámetro MSGPRO en las opciones de control del programa)

Para trabajos futuros se recomienda mejorar la colección de la dirección de viento a las 36 direcciones que se utilizan internacionalmente (cada 10 grados), que actualmente se encuentra solo para 8 direcciones lo que provoca resultados en las concentraciones muy perfilados y también cuando la velocidad es menor que 1 m/seg pero no cero. [En este caso, actualmente se asume una dirección igual a 0, lo que elimina la posibilidad de conocer la dirección real del viento.](#)

Para cada una de los casos de estudio, se definió la estación meteorológica más cercana o representativa, de acuerdo a recomendaciones del IMN. A continuación se muestra el listado de las estaciones meteorológicas seleccionadas para cada uno de los casos.

Fuente

Estación meteorológica

El Alto de Ochomogo	Ochomogo
Moin Refineria RECOPE	Limón
Fabrica Nacional Licores	Fabio
Punto Rojo	Aeropuerto
Planta Térmica MOIN ICE	Limón
Beneficio Coopro-Naranjo	Aeropuerto

3.3 Funciones exposición – repuesta consideradas.

En el marco de este trabajo solamente será evaluado el impacto de las emisiones de contaminantes atmosféricos en la salud humana. Las F_{ER} que debieran utilizarse en una evaluación de impacto son aquellas obtenidas específicamente para el sitio donde se encuentra ubicadas las fuentes de emisión, con el objeto de tomar en cuenta la incidencia de factores naturales y socioeconómicos, que actúan como agentes confusores o modificadores. Sin embargo, esto no sucede frecuentemente; debido al costo y complejidad de los estudios epidemiológicos este tipo de información no siempre está disponible para el sitio específico. Para el caso de Costa Rica se investigó sobre la existencia de estudios epidemiológicos desarrollados con anterioridad y como resultado se obtuvo que no existían, por ello, se decidió utilizar F_{ER} obtenidas en estudios desarrollados en otros países, para ello se analizaron los trabajos llevados a cabo por Ralb (2002)²¹, Ostro (WHO, 1996), APHEA (1997)²² y ECOURS (2000)²³.

Teniendo en cuenta que se contaba con valores de F_{ER} provenientes de diferentes estudios, se decidió tomar aquellas que provocaron los menores daños cuando existía más de una referencia. Para ello nos apoyamos en estudios realizados de calidad de aire en la provincia de San José (CICA, 2003)²⁴, estos estudios muestran que los contaminantes rara vez superan los valores normados diarios para los cuatro meses que duró el monitoreo, sin embargo para los casos de PM_{10} y SO_2 el promedio de datos obtenido supera las normas anuales.

Las pendientes de las F_{ER} fueron calculadas de acuerdo a la ecuación 7 mostrada en la Sección 2.2

Podrían emplearse las F_{ER} tal y como se obtuvieron para los estudios originales pero se ajustan más a las condiciones de cada región de emplearse las tasa de incidencias propias y la fracción de la población realmente afectada como se recomienda en Ralb (2002).

En el estudio se evaluaron para todas las plantas los PM_{10} , los óxidos de azufre y los óxidos de nitrógeno, además se incluirán contaminantes secundarios como sulfatos y nitratos (formados partir de las especies primarias emitidas), a pesar de que solamente es interés por parte de los especialistas de Costa Rica la evaluación de contaminantes primarios.

Las funciones propuestas a utilizar son: mortalidad crónica y aguda, bronquitis crónica, días de actividad restringidos, admisiones hospitalarias y visitas a salas de urgencia. Los resultados del proyecto ExternE, mostraron que la contribución a los costos daño de la mortalidad crónica, la bronquitis crónica y los días de actividad restringidos resultó del 85%, 10% y 4% del costo total en la salud para PM_{10} . Por ellos, se decidió no excluir ni la mortalidad, ni la bronquitis, ni los días de actividad restringidos del análisis e incorporarle además, las admisiones hospitalarias y visitas a salas de urgencia, ya que para estos efectos fue posible encontrar datos de incidencia y estimar sus costos a partir de las estadísticas publicadas en Costa Rica.

En la Tabla 4 se muestran los IRR a utilizar provenientes de los estudios antes mencionados. Para los SO_2 se emplearan los IRR recomendados en el estudio de Ralb (2002). Para las PM_{10} , en el caso de la mortalidad crónica, bronquitis crónica y visitas a salas de urgencia se emplearán los IRR del estudio

ECOURS (2000), en los casos de las restantes F_{ER} de morbilidad (admisiones hospitalarias y Días de actividad restringidos) se emplearán los valores recomendados por Rabl (2002).

Para los NO_x existe el inconveniente de que a pesar de que numerosos estudio en animales han reportado efectos de estos en la salud, los estudios epidemiológicos no han sido lo suficientemente convincente sobre estos efectos en los humanos y estos son considerados fundamentalmente como vía directa en la formación de Ozono y Nitratos. Los estudios que relacionan los efectos en la salud de los NO_x , no son abundantes como los estudios de partículas, por lo que se decidió para este estudio emplear las F_{ER} de NO_x recomendadas por Anderson et al (1997)²⁵ y Touloumi (1997)²⁶ para las admisiones hospitalarias y la mortalidad aguda, respectivamente obtenidas en el marco del proyecto APHEA y de esta forma tener en cuenta los efectos en la salud de este contaminante.

Para los sulfatos y nitratos las F_{ER} fueron obtenidas a partir de las funciones para PM_{10} , tomando en consideración los criterios de ExternE. Dichos criterios consideran que las partículas emitidas por los procesos de combustión tienen un diámetro aerodinámico equivalente a 10 micrones; estudios de la contaminación atmosférica realizados en Estados Unidos han mostrado que el 60% de la distribución de masa corresponde a partículas inferiores a 2.5 micrones, que son las que pueden penetrar más profundo en los pulmones y causar un mayor impacto en la salud de los receptores. Para tomar en cuenta este hecho, la pendiente de la función para partículas de 2.5 micrones se aumenta en un factor de 1.67 con respecto a la pendiente de las partículas de 10 micrones (Spadaro, 1999).

Debido a la similitud con el diámetro de las partículas es posible tomar los valores de IRR para los sulfatos igual al de las $PM_{2.5}$ y los de los nitratos igual al de las PM_{10} (Rabl, 2002). La distribución de diámetros de los sulfatos, según el estudio de Sheridan et al (1994)²⁷ se encuentra mayormente entre 0.3-2 μm , por lo que pueden asociarse perfectamente a las $PM_{2.5}$. Para el caso de los nitratos, la distribución de sus diámetros está entre 0.3-4.2 μm , según Milford y Davidson (1987)²⁸ por lo que se asocian a las PM_{10} . Cabe mencionar que en otros estudios los diámetros de estas partículas (sulfatos y nitratos) se encuentran en un rango mucho más amplio que el de las referencias citadas. Estas aproximaciones introducen algunos errores, ya que al utilizar para los nitratos la misma pendiente que para las PM_{10} , se está asignando un efecto a los primeros que corresponde a una mezcla de contaminantes, formados no solo por nitratos, sino también por sulfatos, entre otros. En realidad no se puede precisar con exactitud a cual contaminante de la mezcla corresponde los mayores efectos. Esto se complica más aún si se considera que los estudios epidemiológicos para PM_{10} se han realizado teniendo en cuenta la calidad del aire en muchas ciudades donde la composición química de las partículas es diferente.

De esta forma las pendientes de las F_{ER} y por tanto los IRR resultan:

$$\begin{aligned} fer, \text{ sulfatos} &= fer, PM_{2.5} \\ fer, \text{ nitratos} &= fer, PM_{10} \quad y \\ fer, PM_{2.5} &= 1.67 * fer, PM_{10} \end{aligned}$$

Tabla 4: IRR recomendados (%/ $\mu g/m^3$)

Efectos	Receptores	IRR para PM_{10} / Nitratos	IRR para SO_2	IRR para NO_2	IRR para Sulfatos
Mortalidad crónica	Mayores de 30 años	0.384 ^{viii}	-	-	0.641
Mortalidad aguda	Población Total	-	0.046 ^{ix}	0.026 ¹³	-

^{viii} Una muerte crónica equivales a 10 años de vida perdido (AVP), por lo tanto en la ecuación hay que multiplicar por 10 AVP para que el resultado quede expresado en AVP/pers* $\mu g/m^3$

^{ix} Una muerte aguda equivales a 0.5 años de vida perdido, por lo tanto en la ecuación hay que multiplicar por 0.5 AVP para que el resultado quede expresado en AVP/pers* $\mu g/m^3$

Bronquitis crónica	Adultos	0.36	-	-	0.601
Días de actividad restringidos	Adultos	0.26	-	-	0.434
Adm. Hosp. Respiratorias	Población Total	0.04	0.04	0.0204	0.066
Adm. Hosp. Cardio vasculares	Ancianos	0.1	-	-	0.167
Visitas a salas de urgencia (Respiratorias)	Población Total	0.311	-	-	0.519

3.4 Tasa de incidencia y fracción de la población

Las tasas de incidencia requeridas en el trabajo para estimar las pendientes de las F_{ER} para algunos de los efectos, pudieron estimarse a partir de las estadísticas de salud reportadas, mientras que en otros fue necesario el empleo de las tasas de incidencias obtenidas en los estudios originales donde fueron obtenidas las F_{ER} .

Para las Admisiones Hospitalarias y las Visitas a Salas de Urgencia, las tasas de incidencia fueron obtenidas de las estadísticas de la Caja Costarricense del Seguro Social (CCSS)²⁹.

En el caso de las admisiones hospitalarias respiratorias, las tasas de incidencia se estimaron a partir de la Tabla de “Egresos Hospitalarias, Estancias Total y Promedio, Por Distrito” (CCSS, 2003). Aquí se asumieron los egresos hospitalarios igual al número de admisiones hospitalarias y se ajustó la población total teniendo en cuenta que alrededor del 80% de la población de Costa Rica se atiende en la CCSS^x. Las F_{ER} de las Admisiones Hospitalarias Cardiovasculares fueron obtenidas para una población mayor de 65 años de edad; sin embargo, las estadísticas obtenidas no separan las admisiones por grupo de edades por lo que se decidió utilizar el valor de incidencia reportado en el estudio de Ralb (2002) y multiplicarlo por la fracción de población mayor de 65 años propia de la región de estudio.

No se pudo obtener el número de Visitas a Salas de Urgencia (respiratoria) por esta razón, para estimar la incidencia de este efecto, se decidió utilizar el número de consultas externas respiratorias, a partir de la tabla “Consultas externas. Sistema Respiratorio. Porcentaje por región de residencia según causas”, CCSS (2002).

Para la Bronquitis Crónica y los Días de Actividad Restringida al no disponer de estadísticas que recojan la incidencia de estos efectos ni similares, se decidió utilizar los valores reportados en los estudios originales.

Las tasas de incidencia para la mortalidad se obtuvieron a nivel de Cantón^{xi} aunque estas estadísticas también es posible obtenerlas a nivel de distrito. Sin embargo, en este trabajo las estadísticas de estos efectos a nivel de cantón resultan suficientes; estadísticas más detalladas se necesitarán para estudios de impacto con mayor nivel de detalle a escala local.

La CCSS recoge un número elevado de estadísticas, lamentablemente, las estadísticas publicadas no nos han sido del todo útil en nuestro trabajo pues necesitamos mayor información de incidencia de enfermedades específicas. Sin embargo, consideramos que para otros trabajos si se le solicita apropiadamente estos valores a los especialistas de la CCSS ellos podrían elaborar esta información de la forma y con la exactitud que se requiere.

Las fracciones de población fueron calculadas para cada Cantón según las Proyecciones de Población tomadas de los datos de la CCSS (2002). Para la Bronquitis Crónica y los Días de Actividad Restringida se tomó como adultos aquellas personas mayores de 15 años, aunque estas funciones fueron inicialmente obtenidas para una población mayor de 18 años y laboralmente activa, respectivamente. Las tasas de incidencia y las fracciones de la población tomadas para cada caso de estudio son mostradas en la Tabla 5.

Tabla 5: Fracciones de población y tasas de incidencias a emplear por caso de estudio

Efecto en salud	Receptores	Limón	Alajuela	Naranjo-Alajuela	Cartago
-----------------	------------	-------	----------	------------------	---------

^x Jaquelin Castillo, Comunicación Personal. CCSS

^{xi} Obtenidas de: Indicadores Básicos. Situación de Salud en Costa Rica, 2003.

		F _{pop}	I _{ref}	F _{pop}	I _{ref}	F _{pop}	I _{ref}	F _{pop}	I _{ref}
Mortalidad crónica	Mayores de 30 años	0.377	0.0041	0.428	0.0039	0.414	0.0032	0.421	0.0037
Mortalidad aguda	Población Total	1	0.0041	1	0.0039	1	0.0032	1	0.0037
Bronquitis crónica	Adultos	0.642	0.0036	0.702	0.0036	0.678	0.0036	0.691	0.0036
Días de actividad restringidos	Adultos	0.642	19	0.702	19	0.678	19	0.691	19
Adm. Hosp. Respiratorias	Población Total	1	0.011	1	0.0067	1	0.01	1	0.0071
Adm. Hosp. Cardio vasculares	Ancianos	0.043	0.06	0.053	0.06	0.057	0.06	0.054	0.06
Visitas a salas de urgencia (Respiratorias)	Población Total	1	0.28	1	0.55	1	0.55	1	0.23

La I_{ref} esta expresada en (casos/pers*año)

3.5 Costos de mortalidad y morbilidad

La estimación de los costos en salud es una tarea compleja que requiere como primer paso definir el punto de vista desde el cual se realizan los cálculos. El costo no es un valor absoluto, sino que puede cambiar en dependencia de la perspectiva desde la cual se asuma. Podría tomarse, por ejemplo, la posición del Gobierno, en cuyo caso, deben tenerse en cuenta no sólo los posibles costos negativos o ahorros en los servicios de salud, sino también los costos la intervención necesaria para lograr reducciones en la concentración y distribución de contaminantes. Una visión más amplia y, probablemente más justa sería la de asumir la perspectiva social, en la que se incluyen los costos para todos los participantes en este proceso, incluidos los gastos y afectaciones que deben asumir los propios pacientes afectados en su salud personal.

Asumir el punto de vista social implica un considerable incremento en la complejidad metodológica de este tipo de estudio. En primer lugar habría que determinar con precisión todos los factores que deben incluirse en el proceso, entre los que podría haber integrantes cuya participación pudiera no resultar del todo evidente. Por ejemplo, Stiep (2002)³⁰ y colaboradores incluyen en la medición del valor total de evitar la morbilidad cardio-respiratoria aguda como efecto de la contaminación atmosférica, los siguientes elementos:

- Valor de los gastos de prevención reducidos,
- Valor del dolor y sufrimientos reducidos,
- Costo de tratamiento incluida la reducción de gastos en la mitigación de la enfermedad, y
- Valor de la pérdida de productividad.

Por otra parte, en algunos casos sería necesario utilizar procedimientos específicos para la estimación de determinados costos, cuando estos no sean sistemáticamente controlados o se carezca de información adecuada de otras fuentes. Un ejemplo de esto serían los llamados Gastos de Bolsillo en que incurren los pacientes, sus familiares y acompañantes, quienes con frecuencia deben asumir el pago de medicamentos, consultas, estudios, transporte, alimentación, cambios en el hogar y otros.

Para la estimación de los costos, en el caso de los efectos de morbilidad, en el proyecto ExternE se emplearon dos estimaciones fundamentales, la primera de ellas basadas en los llamados Costos de Enfermedad que incluyen los Gastos de Bolsillos de los pacientes como resultado de la enfermedad y los Costos de Oportunidad que representan cualquier pérdida como resultado de la enfermedad; y la segunda basada en la Voluntad a pagar. Considerar solamente la primera tiene la desventaja que no se tienen en cuenta como son afectadas las preferencias individuales de las personas por encontrarse enfermas, ni el hecho de cuanto estarían dispuestos a invertir por reducir el riesgo a la enfermedad (ver Markandya, 2002)³¹.

No existen estudios previos en Costa Rica para determinar los costos asociados a las enfermedades provocadas o agravadas por la contaminación ambiental desde ninguna perspectiva, aunque existe un estudio en ejecución con especialistas de la Dirección de Desarrollo de la Salud del Ministerio de Salud donde se estimaran algunos costos. Por lo tanto para este estudio, se decidió estimarlos a partir de los costos reportados en las estadísticas oficiales (Costos estimados para la CCSS) y en el caso que no fuera posible, utilizar costos obtenidos en estudios realizados por la Unión Europea transferidos a las condiciones de Costa Rica.

Los costos obtenidos por las estadísticas oficiales (CCSS) no tienen en cuenta todos los gastos directos^{xii} ni los gastos indirectos^{xiii} en que incurren los pacientes, afectaciones en la calidad de vida, disponibilidad a pagar por no enfermar, entre otros; por lo que asumirlos constituye un estimado bastante bajo. Por lo tanto, se decidió a los costos obtenidos sumarle los costos de pérdida de productividad^{xiv}, basándonos en los estimados de días promedios de hospitalización por tipo de enfermedad y en los salarios promedios, sin embargo, debemos tener en cuenta que los pacientes para su recuperación emplean más días que los que permanecen en el hospital y que estos enfermos pudieran ser ancianos o niños no vinculados directamente a la producción. El enfoque de pérdida de productividad se basa en determinar el costo del tiempo que una persona pierde por estar enferma o por muerte prematura, y la consecuente disminución en la producción considerando que esta persona no pudo trabajar.

3.5.1 Costos de Mortalidad

Para estimar los costos de mortalidad se utilizó el enfoque de Años de Vida Perdidos (AVP), empleado en el proyecto ExternE. En dicho proyecto, como se señaló anteriormente, se determinó el valor de un AVP considerando el Valor Estadístico de la Vida estimado para la población europea. Se transfirieron los valores de AVP, obtenidos para la Unión Europea (Spadaro, 2002) a Costa Rica de acuerdo a la ecuación 9 del epígrafe 2.3. Como los costos unitarios obtenidos para la Unión Europea se encontraban en USD del 2000 se llevaron a US 2002 asumiendo una tasa de inflación anual del 2%. Los valores el PPP PNB para Costa Rica (8560) y la Unión Europea (25700) se obtuvieron de las estadísticas del Banco Mundial (WDI, 2004)³², que recoge los estimados para el año 2002, de esta forma el factor de transferencia resultó de 0.33. El valor de un AVP se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6: Valor de 1 AVP en USD con tasa de transferencia de 0.33

Tipo de Mortalidad	Europa	Costa Rica
Mortalidad Aguda	181,029.6	59,739.8
Mortalidad Crónica	105,080.4	34,676.5

Se asume en este trabajo, tal y como se propone en las Metodologías Simplificadas del OIEA (Spadaro, 2003) que un caso de muerte crónica equivale a 10 AVP y que un caso de muerte aguda equivale a 0.5 AVP.

3.5.2 Costos de Morbilidad

^{xii} Incluye los gastos de bolsillo

^{xiii} Incluye. Días perdidos por el tiempo gastado en atención médica (transporte, espera en consulta, sección con el médico, etc), tiempo de hospitalización, días de actividad limitada, pérdidas en el ingreso, etc.

^{xiv} La pérdida de productividad es un método de valoración que calcula las pérdidas en la producción debido a enfermedades o algún evento asociado con el ambiente.

En el caso de la Morbilidad, para la bronquitis crónica, se transfirieron los costos de la Unión Europea de la misma forma que los costos de mortalidad, como resultado se obtuvo un valor de 18498.3 USD.

Como valor de un día de actividad restringido se utilizó el salario promedio por cantón, reportado en las estadísticas oficiales de Costa Rica considerando laborables 22 días por mes.

Para las Admisiones hospitalarias se empleó el costo por estancia reportado por la CCSS para el año 2002, el cual fue de 83780 colones, al no estar disponer entre las estadísticas publicadas del costos para cada cantón empleamos el promedio institucional para el país. El valor de una visita a sala de urgencia se tomó igual al de las consultas externas debido a que las estadísticas no separan estos valores, se tomaron valores para cada región al no disponer de valores a nivel de cantón. Es bueno señalar que para convertir a US dólares los costos unitarios de los efectos antes mencionados, se utilizó la tasa de cambio vigente en Diciembre del 2002 e igual a 376.9 colones por cada USD.

Para el enfoque de pérdida de productividad se utilizó los días de estancia promedio reportado por las estadísticas en el caso de las admisiones hospitalarias, mientras que para las visitas a salas de urgencia utilizaremos 5 días, valor utilizado en el estudios ECOURS (2000),

En la siguiente (Tabla 7) se muestra los costos a emplear en el estudio. Utilizaremos para los cálculos los costos estimados de la CCSS más los costos estimados de Perdida de Productividad (PP).

Tabla 7: Costos unitarios para impactos de morbilidad (USD)

Efecto en Salud	Limón		Alajuela		Naranjo-Alajuela		Cartago		Costos
	Costo/CCSS	PP	Costo/CCSS	PP	Costo/CCSS	PP	Costo/CCSS	PP	Transf.
1. Bronquitis crónica	-	-	-	-	-	-	-	-	18,498.3
2. Admisiones Hosp.									
Respiratorias	1,405.7	90.2	1,436.3	79.3	1,040.4	43.1	1,409.0	70.8	1,558.7
Cardiovasculares	1,469.1	94.3	2,083.0	115.0	1,589.1	65.8	1,678.5	84.3	1,174.2
3. Días de actividad restringidos	-	14.3	-	12.3	-	9.2	-	11.2	39.8
4. Visitas a salas de urgencia	23.3	71.3	20.2	61.4	26.3	46.0	11.3	55.8	-

Donde:

Costo/CCSS: Costo reportado por la CCSS.

PP: Pérdida de productividad.

Transf.: Costo transferido de la Unión Europea.

Aunque solamente se emplearan los costos trasferidos para la bronquitis crónica y la mortalidad, de la tabla anterior se puede apreciar que los costos estimados no difieren muchos del valor que tendría el costo transferido en los efectos evaluados.

3.6 Otros contaminantes

En el marco del estudio no pudieron realizarse las estimaciones para las Dioxinas y los Furanos, contaminantes que se relacionan con el cáncer, debido a que en las calderas que donde se realizan mediciones de estos contaminantes no fueron incluidas en esta etapa del estudio. La F_{ER} y costos recomendados para Dioxinas y Furanos son mostrados en la Tabla 8.

Tabla 8: F_{ER} y costo, recomendados para Dioxinas y Furanos

Efecto en salud	Receptores	fer (casos/personas*año* $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Costos (USD/caso)
Cáncer	Población total	0.602	1,500,000

Los valores de pendiente de la F_{ER} y costos son los empleados del proyecto ExternE (Spadaro, 1999)

4 RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGIA

En este capítulo se presentan los resultados de la aplicación de la metodología para la evaluación de los costos externos para todos los casos analizados.

4.1 Resultados de la evaluación de emisiones

Aunque no estaba contemplado como un objetivo del proyecto y se tomo como punto de partida, para futuros trabajos se debe sistematizar la fuente de estimación de las emisiones.

4.2 Resultados de los estudios de dispersión de contaminantes

El punto de referencia para la evaluación de las concentraciones son los valores de concentraciones normados que aparecen en la Tabla 9.

Tabla 9: Concentraciones máximas permitidas para evitar daños en la salud

	Contaminante	Concentración en 24 horas	Concentración Anual
Norma	SO ₂	365 µg/m ³	80 µg/m ³
	NO ₂	400 µg/m ³	100 µg/m ³
	PM ₁₀	150 µg/m ³	50 µg/m ³

Se realizaron los cálculos de las concentraciones promedios anuales y para 24 horas. El modelo permite calcular las concentraciones promedio anuales en cada punto receptor del dominio. A continuación se presentan la Tabla 10 que resume las concentraciones máximas promedio anuales encontradas en al menos un punto receptor del dominio de cada planta para SO_x, NO_x y PM₁₀.

A su vez la Tabla 11 muestra las concentraciones máximas diarias encontradas en al menos un punto receptor del dominio de cada planta en al menos un día del período evaluado (tres años) para SO_x y NO_x. Para PM₁₀ se indica el cuarto valor máximo, de acuerdo a los cambios introducidos a partir de 1997 en las normas de calidad del aire en EEUU (National Ambient Air Quality Standards, NAAQS) para el procesamiento de PM₁₀.

Tabla 10: Concentraciones máximas promedio anual

Fuente	PM10	SOx	NOx
	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³
El Alto de Ochomogo	3.59	98.26	12.53
Moin Refineria RECOPE	3.35	180.00	43.39
Fabrica Nacional Licores	2.62	48.47	12.04
Punto Rojo	0.39	11.13	3.11
Beneficio Coopro-Naranjo	3.50	1.12	8.68

Tabla 11: Concentraciones máximas diarias

Fuente	PM10	SOx	NOx
	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³
El Alto de Ochomogo	6.45	211.14	26.90

Moin Refineria RECOPE	6.14	548.12	134.11
Fabrica Nacional Licores	10.30	230.41	57.23
Punto Rojo	1.88	91.41	25.35
Beneficio Coopro-Naranjo	13.91	5.70	44.19

Como puede observarse en las tablas anteriores, las concentraciones que superan las normas, se encontraron en el dominio de la refinería, por un amplio margen, y de las calderas del Alto de Ochomogo, para las emisiones de SO₂. El análisis de las evaluaciones realizadas a la refinería se presenta, por su complejidad, en una sección independiente. En el caso del Alto de Ochomogo, los altos valores están condicionados por la topografía compleja del terreno, por la baja altura de las chimeneas y porque fueron evaluadas las tres calderas, lo que no se realizó para el resto de las fuentes por no disponerse de todos los datos. El valor normado anual se supera pero sólo en zonas muy cercanas a la fuente,- el máximo se alcanza en (-250.00, 250.00)-, por lo que el cumplimiento de una zona de protección sanitaria apropiada alrededor de las calderas puede evitar impactos dañinos a la salud. Ver Figura 5. Para las concentraciones en 24 horas, en ningún día de los 26280 evaluados (3 años), es superada la norma. El máximo se alcanza en el mismo punto, pero es de 211 µg/m³, contra la norma de 365.

Debe prestarse especial atención en la modelación de la dispersión a la definición del ambiente para el que se realiza (urbano/rural). Los resultados mostrados en las tablas anteriores se obtuvieron considerando para el Alto de Ochomogo y Punto Rojo un ambiente urbano. Dado que los asentamientos poblacionales en Costa Rica no pueden compararse a las grandes ciudades, se repitió el cálculo considerando zona rural. Los resultados para las concentraciones máximas promedio anual se incrementan en un orden del 60% (9.95, 272.00 y 34.68 para Ochomogo y 1.12, 32.14 y 8.94 para Punto Rojo). Aun así la zona con concentraciones por encima de la norma para el Alto de Ochomogo es muy pequeña. En estas condiciones de modelación se sobrepasa el valor normado para las concentraciones de SO_x en 24 horas en 131 días de los tres años evaluados en el receptor -250, 250, alcanzando un valor máximo de 493.7 µg/m³. Estos resultados pueden ser fácilmente identificados usando la opción de salida del ISC que crea un fichero independiente con todos los valores de concentraciones que superen un valor umbral establecido (MAXIFILE).

Para confirmar la necesidad de considerar la topografía del terreno, se repitieron los cálculos considerando terreno plano. Las concentraciones máximas promedio anual Los resultados para PM₁₀, SO₂ y NO_x en para Ochomogo fueron de 6.06, 166 y 21.16 µg/m³ respectivamente considerando ambiente rural, lo que implica una diferencia del orden del 40%.

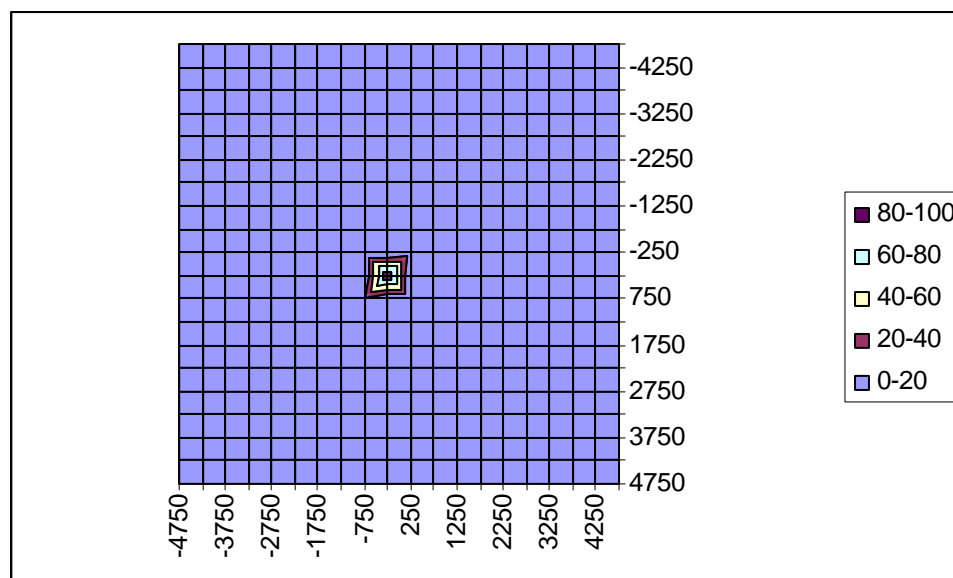


Figura 5: Concentración anual de SO₂ debido a las calderas de El Alto de Ochomogo (µg/m³)

Con el objeto de relacionar estas concentraciones, con su potencial de impacto en la salud humana, se presentaran más adelante las gráficas X, Y, Z en las que se muestran las concentraciones para los tres contaminantes y para cada caso de estudio (Ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

4.2.1 Moin Refinería RECOPE

~~Se modelaron 12 fuentes divididas en tres grupos, Calderas, Hornos y Antorchas. Los datos utilizados en los cálculos aparecen en la Tabla 12. El punto al que corresponden las coordenadas recibidas para la refinería en la proyección Plana Lambert Norte (X=635817, Y=219834) fue localizado arbitrariamente, lo más equidistante posible de las calderas y los hornos (Ver Figura 6).~~

En una misma corrida del ISCST3 se modelaron 12 fuentes divididas en tres grupos, Calderas, Hornos y Antorchas. Los datos utilizados en los cálculos aparecen en la Tabla 12. La primera columna de esta tabla, encabezada como ID, es el identificador de la fuente y se utiliza en la Figura 6 para indicar su localización, que se determinó en base al plano de su ubicación real. El punto al que corresponden las coordenadas recibidas para la refinería en la proyección geográfica Plana Lambert Norte (X=635817, Y=219834) fue localizado arbitrariamente, lo más equidistante posible de las calderas y los hornos y se identifica como ORIGEN en la Figura 6.

El ISCST3 permite especificar las coordenadas en el sistema UTM (Universal Transverse Mercator). Este sistema usa como unidad básica de medida, el metro, que permite una definición más precisa de localizaciones específicas que la latitud/longitud. El sistema utilizado en Costa Rica es el cónico de Lambert, también basado en metros por lo que puede ser usado sin dificultad. El ISCST3 también permite usar un sistema de coordenadas “local”, no basado en un sistema de coordenadas geográficas estándar, que comúnmente define su origen en 0,0. Este punto corresponde a la localización de la fuente a evaluar en caso de una sola fuente, o a una posición equidistante en caso de un grupo de fuentes. Se decidió usar la primera opción para obtener concentraciones geo-referenciadas que puedan ser fácilmente representadas sobre mapas.

La antorcha (identificada como flare), se cálculo también con el ISC, utilizando la metodología que se describe a continuación.

Las antorchas pueden tratarse como las fuentes puntuales, sólo que como dato de entrada se requiere: en lugar de la altura de emisión (para fuentes puntuales, la altura de la chimenea), la altura efectiva de emisión, que tiene en cuenta la longitud de la llama, en lugar del diámetro interior real de la antorcha, un diámetro efectivo que simula la fuerza ascensional real del flujo de gases emitidos en la antorcha teniendo en cuenta la pérdida de calor por radiación.

La altura efectiva de emisión h_{ea} se calcula como:

$$h_{ea} = h_a + 0.00456 \left(\frac{H}{4.1868} \right)^{0.478} \quad [14]$$

Donde:

h_a , Altura real de la antorcha, m

H , Calor liberado en la antorcha, Joule/seg, (1 cal = 4.1868 Joule), que puede ser calculado a su vez como:

$$H = 44.64 * V * \sum_{i=1}^n f_i H_i \quad [15]$$

V , flujo volumétrico de gases a la antorcha, m³/s,

f_i , fracción volumétrica de cada uno de los n componentes de los gases,

H_i , calor específico de cada componente, Joule/g-mole,

El diámetro efectivo de la antorcha puede ser estimado igualando la fuerza ascensional calculada para la antorcha con la de una fuente puntual. La fuerza ascensional para las antorchas F_a , se calcula como:

$$F_a = \frac{g(1-P)H}{\pi \rho T C_p} \quad [16]$$

Donde:

g , aceleración de la gravedad, m/seg²

ρ , densidad del aire, kg/m³

T , temperatura del aire, K

C_p , calor específico a presión constante, Joule/(Kg. K)

P , [fracción](#) de pérdida de calor por radiación. Depende de las condiciones de quemado y es específica para cada antorcha aunque pueden usarse valores por defecto. Los valores por defecto reportados varían desde 25³³ hasta 55% (EPA, 1995a).

Asumiendo $\rho=1.205$ kg/m³, $T=298$ K y $C_p=1005$ Joule/(Kg. K), ~~y $P=0.4$~~ , obtenemos finalmente:

$$F_a = 8.65 * 10^{-6} (1 - P) H \quad [17]$$

La fuerza ascensional para los gases emitidos desde una chimenea convencional, F_c puede calcularse como:

$$F_c = \frac{g w r_c^2 (T_g - T)}{T_g} \quad [18]$$

Donde:

w , velocidad de salida de los gases, m/s

d_c , radio interno de la chimenea,
 T_g , temperatura de salida de los gases

En caso de no conocerse la temperatura que se alcanza en la antorcha, se puede usar un valor por defecto de 1273 K. Igualando las ecuaciones 17 y 18, después de calcular la fuerza ascensional que provoca la antorcha y considerando la velocidad real de salida de los gases, se puede estimar el valor del radio efectivo que debe tener una fuente puntual para generar la misma fuerza ascensional que la antorcha. Se reitera que por falta de datos precisos se realizaron las siguientes consideraciones:

- $H=3.0 \text{ E}+07 \text{ Joule/seg}$
- $T_g= 1273 \text{ K}$
- $T= 298 \text{ K}$
- $P= 0.4$

Tabla 12: Datos utilizados en la modelación de la Refinería

[illegible]

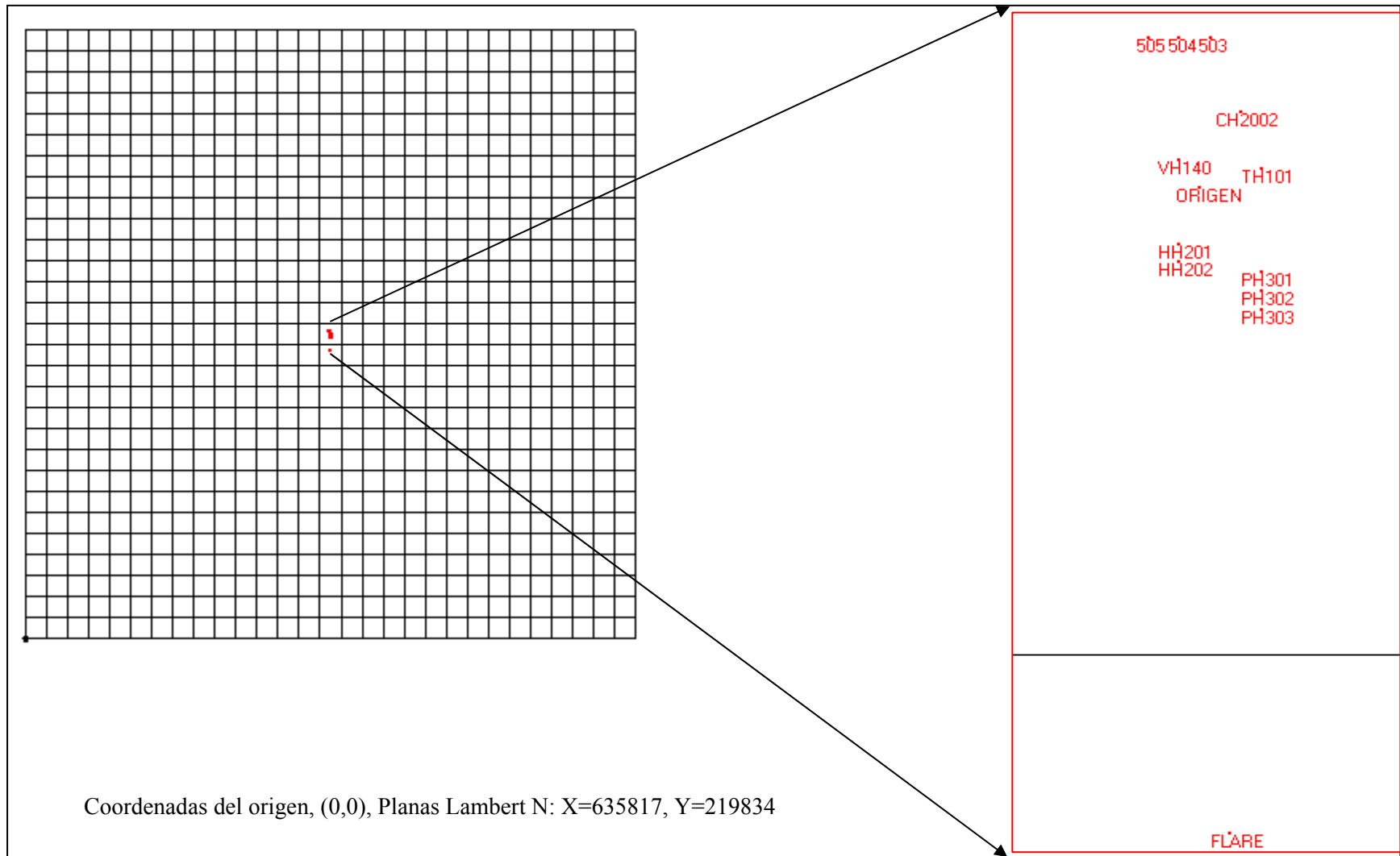


Figura 6: Localización de las Fuentes simuladas

Como se indicó anteriormente, las concentraciones máximas anuales de SO_x ascienden a $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$, lo que supera en 2.5 veces el valor normado ($80 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Este valor se localiza en las coordenadas (1750, 1750) considerando el origen en (0,0). Este punto se ubica sobre un área poblada (203 personas en $500 \times 500 \text{ m}$).

Es interesante analizar como contribuye cada grupo de fuente a las emisiones totales de SO_x de la refinería y a las concentraciones de SO_x en el aire en el punto donde se alcanzan las concentraciones máximas. La antorcha aporta el 49% de las emisiones, las calderas el 35% y los hornos el 16%, sin embargo la concentración promedio máxima anual ($179.86 \mu\text{g}/\text{m}^3$) que se alcanza en el receptor 1750, 1750 es provocada son producidos en un 62% por las calderas, en un 37% por los hornos y solo en un 1% por la antorcha. Ver Figura 7 y Figura 8. Esta baja contribución de la antorcha está determinada fundamentalmente por su mayor altura y por la elevada fuerza ascensional de la pluma que se produce por las altas temperaturas de los gases de escape.

La contribución de cada grupo de fuente a las emisiones se determinó en base a las emisiones en g/seg reportadas en la Tabla 12.

Las concentraciones máximas anuales de NO_x se acercan a la mitad del valor normado ($100 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Las de PM_{10} permanecen bastante alejadas de los respectivos valores normados.

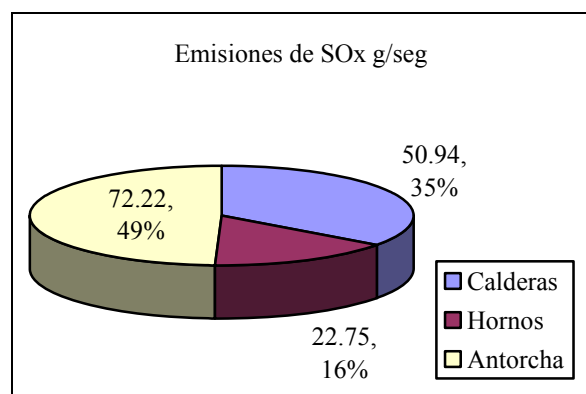


Figura 7: Contribución de los grupos de fuentes a las emisiones de SO_x

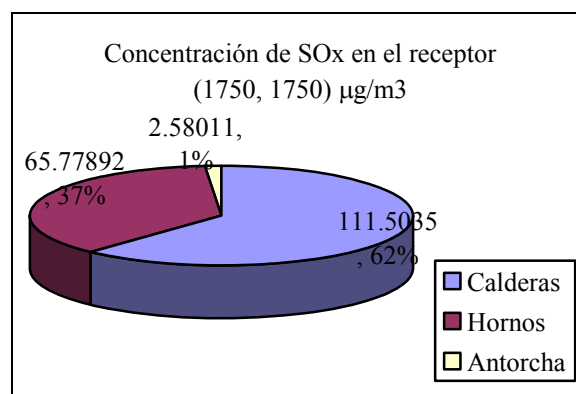


Figura 8: Contribución de los grupos de fuentes a las concentraciones de SO_x en el receptor donde se alcanzan las concentraciones máximas

En 6 receptores se alcanzan concentraciones medias anuales de SO_x que superan el valor normado, tres de ellos localizados en áreas pobladas.

Referente a las concentraciones en 24 horas, se supera el valor normado de las concentraciones de SO_x , en 2 días-receptores en -750, -750.

4.3 Resultados de la evaluación económica

Después de aplicar la metodología vías de impacto con todas las especificaciones realizadas en los capítulos anteriores se obtuvo como resultado que los costos totales del daño estuvieron entre 5 y 271 mil dólares anuales. Los resultados más bajos corresponden al Beneficio Coopero-Naranjo mientras que los más altos pertenecen a la refinería ubicada en Limón. Estos resultados coinciden perfectamente con los contaminantes atmosféricos emitidos por estas industrias y su régimen de operación. Los resultados para las otras calderas evaluadas se pueden observar en la Tabla 13.

Se debe señalar que para todos los casos se utilizó la estimación baja de costos de morbilidad, o sea, se incluye los costos obtenidos desde la perspectiva de la CCSS más la pérdida de productividad sin tener en cuenta la voluntad a pagar. Estos resultados son en la práctica mucho más bajos de los que realmente existen, debemos tener en cuenta que se ha empleado la estimación baja en salud para morbilidad y que no se han considerado el impacto en otros receptores como lo son: cosechas agrícolas, ecosistemas, aguas, calentamiento global, etc.

Aunque se evaluó tanto; el impacto local y regional de los contaminantes primarios SO_x , NO_x y PM_{10} , como el impacto regional de los sulfatos y nitratos formados a partir de los óxidos de azufre y nitrógeno; teniendo en cuenta el interés de los especialistas de Costa Rica de identificar claramente el impacto local de los contaminantes primarios, los resultados se muestran por separado en las tablas siguientes. Se aclara que por regional se entiende el impacto fuera del dominio local definido, que en estos casos es bastante estrecho, 10 x 10 km centrado en la fuente, excepto para la refinería donde es de 15 x 15 km.. De forma general el aporte local de los contaminantes primarios representó alrededor del 95% del impacto total de estos contaminantes para todos los casos de estudio.

Tabla 13: Costos Totales para cada contaminante

Casos de estudio	Cotos Totales (USD/año)					
	Contaminantes Primarios (Impacto Local y Regional)			Contaminantes Secundarios (Impacto Regional)		Total
	PM_{10}	SO_x	NO_x	Sulfatos	Nitratos	
Punto Rojo	5,308.5	2,968.0	455.6	8,991.2	938.4	18,661.6
Fca Nacional de Licores	3,448.3	819.9	114.4	8,732.7	1,307.8	14,423.2
Beneficio Coopronarango	4,649.7	56.7	247.2	113.1	547.6	5,614.2
El Alto de Ochomogo	4,711.3	2,642.1	189.0	9,831.9	737.0	18,111.2
Moin Refineria RECOPE	41,655.3	49,469.1	6,164.2	162,739.7	11,046.9	271,075.2

Tabla 14: Costos Totales de los contaminantes primarios

Casos de estudio	Cotos Totales (USD/año)					
	PM_{10}		SO_x		NO_x	
	Por Imp. Local	%	Por Imp. Local	%	Por Imp. Local	%
Punto Rojo	5,120.98	96.47	2,863.62	96.48	445.35	97.76
Fca Nacional de Licores	3,167.67	91.86	752.76	91.81	104.98	91.76
Beneficio Coopronarango	4,434.15	95.36	55.38	97.57	240.96	97.47
El Alto de Ochomogo	4,496.95	95.45	2,523.87	95.52	180.47	95.51
Moin Refineria RECOPE	41,149.12	98.78	47,251.68	95.52	140.56	97.71

Es imprescindible evaluar el aporte de los contaminantes secundarios. En ningún caso se debe limitar el análisis a los impactos provocados por los contaminantes primarios pues estos son transformados a otras especies también perjudiciales a la salud humana y pueden llagar a trasportarse a varios kilómetros de la fuente de emisión. Esto puede confirmarse del análisis de los gráficos del **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**; para todos los casos de estudio y fundamentalmente para la refinería y El Alto de Ochomogo: se obtuvieron valores apreciables de las concentraciones de los contaminantes en el aire más allá del dominio seleccionado. Esto se evidencia en la interrupción de las isóneas de concentración.

Los resultados muestran que los costos debido a los contaminantes secundarios son ligeramente superiores a los costos por los primarios, esto entre otros factores esta determinado por la forma de

evaluación del impacto regional por el modelo SIMPACTS (ecuación simplificada, SUWM), por lo que se recomienda estimular los trabajos que permitan mejorar la metodología de evaluación del impacto regional a partir de aplicar modelos dispersión de contaminantes detallados. Además, se evalúan un número mayor de F_{ER} para los sulfatos y nitratos que para los SO_x y NO_x , esto está influenciado por el hecho de que son mucho mayores los estudios disponibles que muestren los efectos de las partículas (de las cuales se obtienen las F_{ER} para sulfatos y nitratos) en la salud humana que para otros contaminantes. Para el Beneficio Coopro-Naranjo el aporte de los contaminantes primarios es mucho mayor que el de los secundarios ya que las emisiones de SO_x son muy bajas y consecuentemente es baja la formación de sulfatos. Las emisiones más importantes en este caso son las de PM_{10} . la siguiente tabla es un resumen de la 13.

Tabla 15: Aportes de los contaminantes primarios y secundarios a los costos Totales

Casos de estudio	Costos Totales (USD/año)			
	Por contaminantes primarios	Por contaminantes secundarios	% por primarios	% por secundarios
Punto Rojo	8,732.0	9,929.6	46.8	53.2
Fca Nacional de Licores	4,382.6	10,040.5	30.4	69.6
Beneficio Coopro-Naranjo	4,953.5	660.6	88.2	11.8
El Alto de Ochomogo	7,542.4	10,568.9	41.6	58.4
Moin Refinería RECOPE	97,288.6	173,786.6	35.9	64.1

Analizando el aporte de los impactos regional y local al costo total podemos concluir que de forma general es superior el impacto regional, excepto para el Beneficio Coopro-Naranjo donde el impacto local resultó superior al regional por lo explicado anteriormente ya que el impacto local depende SOLO de los contaminantes primarios y el regional, FUNDAMENTALMENTE de los secundarios.

Tabla 16: Aportes del los impactos locales y regionales a los costos Totales

Casos de estudio	Costos Totales (USD/año)			
	Por Impacto Local	Por Impacto Regional	% Local	% Regional
Punto Rojo	8,429.94	10,231.66	45.15	54.83
Fca Nacional de Licores	4,025.41	10,397.74	27.91	72.09
Beneficio Coopro-Naranjo	4,730.39	883.78	84.26	15.74
El Alto de Ochomogo	7,201.30	10,909.92	39.76	60.24
Moin Refinería RECOPE	94,424.47	176,650.76	34.83	65.17

A partir del análisis de incertidumbre (epígrafe 2.3) pudo obtenerse un estimado bajo y alto de los costos, los cuales son mostrados en la Tabla 15. Esto nos da una medida del rango en que podrían encontrarse los costos estimados, es bueno señalar que para todos los análisis se utiliza el costo medio.

Tabla 17: Estimados bajo y alto de los costos

Casos de estudio	Costos Totales (USD/año)		
	Costo medio	Costo bajo	Costo alto
Punto Rojo	18,661.6	4,738.7	76,951.8
Fca Nacional de Licores	14,423.2	4,105.5	52,565.1
Beneficio CooproNaranjo	5,614.2	1,493.4	21,668.9
El Alto de Ochomogo	18,111.2	4,611.7	74,053.8
Moin Refinería RECOPE	271,075.2	68,651.3	1,123,581.3

Los mayores costos específicos por tonelada de contaminante emitido corresponden a las partículas, seguidas por los SO_x y por último los NO_x. Uno de los aspectos que influye en estos resultados es el hecho de que para las partículas estamos evaluando un número mayor de F_{ER}, por las razones expuestas en la Sección 3.3. Disponer de esta información es importante ya que si se pretendieran internalizar la externalidades por medio de impuestos directos por tonelada de emisión de contaminantes, los mismos podrían estar en el orden de magnitud de los resultados obtenidos (Ver Tabla 18).

Tabla 18: USD/ton de contaminante emitido

Casos de estudio	USD/ ton de contaminante emitida						
	PM ₁₀	SO _x			NO _x		
		SO _x	Sulfatos	Total	NO _x	Nitratos	Total
Punto Rojo	989.9	19.3	58.5	77.8	17.0	35.0	52
Fca Nacional de Licores	648.7	8.3	88.3	96.6	4.6	52.9	57.5
Beneficio Coopronaranjo	601.8	23.4	46.7	70.1	12.6	27.9	40.5
El Alto de Ochomogo	693.9	14.5	53.9	68.4	8.1	31.6	39.7
Moin Refinería RECOPE	2,671.4	16.5	54.3	70.8	18.2	32.6	50.8

La mortalidad tuvo un aporte superior a la morbilidad en todos los casos lo cual es lógico teniendo en cuenta que son los costos de mortalidad son superiores a los de morbilidad (ver Tabla 19).

Tabla 19: Contribución de los impactos de mortalidad en los costos totales

Casos de estudio	% en el costo total			
	Impacto Local		Impacto Regional	
	Mortalidad	Morbilidad	Mortalidad	Morbilidad
Punto Rojo	82.0	18.0	74.9	25.1
Fca Nacional de Licores	58.8	41.2	49.6	50.4
Beneficio Coopronaranjo	75.8	24.2	74.5	25.5
El Alto de Ochomogo	83.0	17.0	77.8	22.2
Moin Refinería RECOPE	83.2	16.8	74.6	25.4

Para la Planta Térmica de Limón a pesar de la ausencia de datos que caracterizan la fuente de emisión como son la altura y diámetro de la chimenea y temperatura para cada una de las chimeneas pudieron realizarse estimaciones del impacto a partir de aplicar el modelo SIMPACTS con las estimaciones 1 del modelo QUERI y 2 de modelo RUWM (ver Tabla 20). Nótese que para los sulfatos y nitratos los costos totales son los mismos para ambos modelos debido a que ambas estimaciones utilizan la ecuación del SUWM para estimar el impacto regional.

Tabla 20: Costos Totales en USD/año por contaminante para la Planta Térmica de Limón

Modelo	Costos Totales USD/año					
	PM ₁₀	SO _x	NO _x	Sulfatos	Nitratos	Total
QUERI	43,150.6	7,660.8	18,559.5	26,260.7	69,379.5	165,011.1
RUWM	24,247.2	4,305.6	10,432.4	26,260.7	69,379.5	134,625.4

En la Tabla 21 se muestran los costos específicos en USD/ton y en Cent/kw-h para la Planta Térmica de Limón para cada contaminante, los costos específicos en cent/kw-h totales fueron de 0.061 y 0.049 cuando se utilizan los modelos QUERI y RUWM respectivamente.

Tabla 21: Costos específicos en USD/ton y en Cent/kw-h para la Planta Térmica de Limón

Contaminante	QUERI		RUWM	
	USD/ton	cent/kw-h	USD/ton	cent/kw-h
PM ₁₀	125.4	0.016	70.5	0.009
SO ₂	73.1	0.012	65.9	0.011
NO _x	44	0.032	39.9	0.029

Cabe señalar que los costos obtenidos con el modelo QUERI, estimación 1 son superiores a los obtenidos con la estimación 2 de RUWM.

CONCLUSIONES

La metodología Vías de impacto fue aplicada para realizar la evaluación de las externalidades en 6 casos de estudio en Costa Rica. Aunque no pudieron evaluarse todas las fuentes propuestas por falta de datos, se pudo adecuar la metodología a las condiciones del país y en estudios posteriores se podrá aplicar a las fuentes no evaluadas. A partir de los resultados del estudio podrá orientarse y refinarse el análisis en etapas ulteriores, con mejor información. También se dispondrá de un marco de referencia para profundizar, en otros estudios, sobre el componente del precio de los energéticos, atribuible al costo de los recursos naturales no renovables.

Los resultados de la evaluación de la calidad del aire en el área de impacto alrededor de las fuentes de emisión, arrojaron que las concentraciones mayores que superan las normas, se encontraron en el dominio de la refinería, por un amplio margen, y de las calderas del Alto de Ochomogo, para las emisiones de SO₂.

De los cálculos de externalidades se obtuvo como resultado que los costos totales del daño estuvieron entre 5 y 271 mil dólares. Los resultados más bajos se obtuvieron para el Beneficio Coopro-Naranjo, una fuente que utiliza una fuente de energía renovable; mientras que los más altos pertenecen a la refinería ubicada en Limón. Estos resultados coinciden perfectamente con las emisiones de contaminantes atmosféricos de estas industrias. Estos resultados son en la práctica mucho más bajos de los que realmente existen. Debemos tener en cuenta que se ha empleado la estimación baja en salud para morbilidad y que no se han considerado el impacto en otros receptores como lo son: cosechas agrícolas, ecosistemas, aguas, calentamiento global, etc.

A escala local los mayores costos específicos por tonelada de contaminante emitida son para las partículas seguida por los SO_x, esta información es importante si se pretende poner impuestos directos a la tonelada de emisión de contaminantes.

Para la Planta Térmica de Limón a pesar de la ausencia de datos que caracterizan la fuente de emisión como son la altura y diámetro de la chimenea y temperatura para cada una de las chimeneas, pudieron realizarse estimaciones del impacto a partir de aplicar el modelo SIMPACTS con las estimaciones 1 y 2 de los modelo QUERI y RUWM, respectivamente.

ANEXO I: INFORME DE REUNIÓN DE TRABAJO 1

29 Marzo- 2 Abril 2004

Lunes 29 Marzo/2004

8.00 AM -12 M: Presentaciones con elementos de la teoría de las externalidades ambientales:

- Evaluación de externalidades: Generalidades
- Metodologías Simplificadas. Modelo SIMPACTS, elementos teóricos

1.00 PM – 4 PM: Instalación del software SIMPACTS, presentación del AIRPACTS (Queri, RUWM, Urban)

Martes 30 Marzo/2004

8.00 AM -12 M: Valoración de los datos disponibles y selección de los casos de estudio:

Datos de población: Dorado, El Alto, Moin

Datos Meteorológicos: Aeropuerto, CIGEFI, Fabio, La garita, Limón, Ochomogo, Pavas

1.00 PM – 4 PM: Caso de Estudio 1: Caldera 503 de la refinería de Limón, fichero de población de Moin, fichero meteorológico de Limón

Miércoles 31 Marzo/2004

8.00 AM -12 M: Caso de Estudio 2: Punto Rojo SA, fichero de población de El Alto, fichero meteorológico de Ochomogo

1.00 PM – 4 PM: Caso de Estudio 3: Horno de cemento de empresa Holcim ubicada en Agua caliente de Cartago, fichero de población de Alto, fichero meteorológico de Ochomogo

Jueves 1 Abril/2004

8.00 AM -12 M: Presentación de los otros modelos de SIMPACTS:

- AGRIMAT
- HIDROPACTS
- DAM

1.00 PM – 4 PM:

- Estimación de emisiones, Base de Datos FIRE
- Presentación del modelo SCREEN. Corrida de prueba para fuentes puntuales y antorchas. Estimación del calor liberado en la antorcha

Viernes 2 Abril/2004

8.00 AM -12 M: Modelo ISCST para modelación de fuentes puntuales.

- Determinación de la estabilidad atmosférica y la altura de la capa de mezcla por las metodologías simplificadas
- Consideraciones de la topografía del terreno

1.00 PM – 4 PM:

- Corrida de caso de prueba con el ISCST (Caso de estudio 1 con topografía no real)
- Presentación de un modelo de dispersión para fuentes lineales: CALINE

FER y costos para corridas de prueba

Contaminate	Nombre Fer	Fer (pendiente)	Costos (USD/casos)
PM10	"RHA Test"	.000012	-
SOx	"Short-term Mortality (YOLL); ALL; [APHEA1997]"	.00000163213	1302
Sulfatos	"Respiratory Hospital Admissions; ALL; [WHO, 1997]"	.0000464519	49893

Evaluación de costos: Transferidos de los estudios de ExterneE con los datos del 1998

- PPP_GDP Costa Rica 5812
- PPP_GDP Unión Europea 20269

Otros temas tratados en cuanto a la modelación de la dispersión

- Consideraciones para usar el modelo ISCST para la modelación de fuentes puntuales de acuerdo a los datos disponibles.
- Agrupamiento de varias fuentes puntuales en una única chimenea para evaluaciones de sondeo
- Criterios para transferencia de concentraciones de un período de premediación a otro

ANEXO II: INFORME DE REUNIÓN DE TRABAJO 2

Fecha: 25 de Abril/2004 al 2 de Mayo/2004

Lunes 26 de Abril/2004

1. Reunión de trabajo con especialistas de la Dirección de Protección Ambiental del Ministerio de Salud de Costa Rica.
Especialista: Ana Villalobos.

Entrevista para definir si existían en el país:

- estudios relativos a la contaminación del aire y la salud y
- datos de costos en salud por enfermedades típicamente asociadas a la contaminación atmosférica.

Como resultado se obtuvieron estudios de monitoreos realizados en San José en los últimos años.

2. Entrevista con especialistas de la Dirección de Desarrollo de la Salud del Ministerio de Salud.
Especialistas: Cristina Vargas (microbióloga), cristinav43@hotmail.com y Lilliam Salas (Farmacéutica), rosasg@costarricense.cr

La entrevista se realizó con el fin de obtener:

- estudios relativos a la contaminación del aire y la salud y
- datos de costos en salud por enfermedades típicamente asociadas a la contaminación atmosférica.

Como resultado no se pudo obtener ningún dato de costos en salud, sin embargo, tuvimos conocimientos de un proyecto en ejecución para relacionar los efectos de la calidad de la salud y estimar sus costos. Este proyecto aún se encuentra en su fase inicial por lo que no se ha podido obtener ningún resultado.

3. Entrevista con el Lic. José Antonio Calvo, Gerente del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC) de Costa Rica, jose.calvo@inec.go.cr
La entrevista se realizó con el fin de obtener datos estadísticos de tasas de Mortalidad a nivel de cantón y datos de incidencia de enfermedades relacionadas con la contaminación atmosférica a nivel de cantón preferiblemente.

Como resultados se obtuvo: Las estadísticas nacionales recogen datos de mortalidad pero no de morbilidad por lo que se recomendó le entrevistas con especialistas de la Caja Costarricense de Seguro Social (CCSS).

4. Entrevista con especialistas de la CCSS.

Especialista: Jacqueline Castillo

La entrevista tuvo como objetivo conocer los datos que son manejados por la CCSS y determinar cuales de ellos pudieran servirnos para nuestro estudio.

Como resultado se obtuvieron los lugares y paginas Web donde está disponible la información que ellos procesan y algunos costos relacionados con las estancias hospitalarias, consultas de urgencia y externa y tasas de incidencia de admisiones por enfermedades respiratorias y cardiovasculares.

5. Entrevista son especialistas del Centro de Investigación en Contaminación Ambiental
Especialista: Dr Mario Segnini.

La entrevista tuvo como objetivo conocer el comportamiento de la calidad del aire en algunas zonas cercanas a las fuentes de emisión a evaluar en el estudio con vistas a conocer el nivel de exposición de la población en esas áreas para la selección de las Funciones Exposición-Respuestas.

Como resultados se obtuvo que solamente se hizo el monitoreo de la calidad del aire en cuatro puntos de la ciudad de San José, los cuales no pueden considerarse como los más representativos pues el monitoreo no pudo realizarse de forma continuada, además se tuvo conocimiento que no fue posible la realización de monitoreo de la calidad de aire en otras zonas del país.

Martes 27 de abril/2004

1. Entrevista con Rosa María Vargas de la Unidad de Vigilancia Epidemiológica del Ministerio de Salud

El objetivo de la entrevista fue la búsqueda de información sobre incidencia de enfermedades relacionadas con la contaminación atmosférica.

2. Entrevistas con José Ángel Villalobos, actuario del Instituto Nacional de Seguros (INS)

La entrevista se realizó para conocer, en primer lugar, si se han realizado estudios en el país para estimar el valor estadístico de la vida o el equivalente a un año de vida perdido y para explorar las posibilidades de realizar estudios de este tipo a través del INS.

Como resultado se obtuvo que no existan estudios de este tipo en el país. Sin embargo se evaluó la posibilidad de realizar un proyecto de conjunto.

3. Trabajo en las oficinas de RECOPE:

En la tarde se revisaron las páginas web de la CCSS con vista s a obtener: datos de demográficos, tasa de incidencia de enfermedades respiratorias, tasas de mortalidad y costos de enfermedades y admisiones hospitalarias. Además, se revisaron los estudios de calidad de aire en la zona de San José

Miércoles 28 de abril/2004

1. Trabajo en las oficinas de RECOPE

A partir de la información obtenida de los estudios de calidad de aire, los datos de emisión de las calderas y de la bibliografía disponible se analizaron y seleccionaron las Funciones exposición-respuesta (FER) a utilizar en la evaluación de Externalidades.

Se elaboró un documento sobre las FER seleccionadas, sus criterios de selección y las referencias.

Jueves 29 de abril/2004

1. Trabajo en las oficinas de RECOPE

Trabajo con los especialistas para organizar la información disponible y reajustar el número de calderas a evaluar.

Se determinó el número de calderas a evaluar y la distribución de las tareas entre los especialistas de RECOPE y CUBAENERGIA.

2. Se siguió trabajando en el procesamiento y búsqueda de información referente sobre tasa de incidencia de enfermedades respiratorias, tasa de mortalidad y costos de enfermedades a nivel de Cantón.

Viernes 30 de abril/2004

Trabajo en las oficinas de RECOPE con el especialista en SIG para precisar los datos necesarios y su formato. Además de determinar la localización exacta de las calderas.

ANEXO III: AIRPACTS

1.1 Modificaciones realizadas al AIRPACTS para adaptarlo a las condiciones de Costa Rica

- Permitir modelar chimeneas de altura entre 5 y 25 m (sustituir 25 m por 5 como altura inferior de la chimenea)
- Permitir modelar chimeneas con temperatura de salida de los gases de escape mayores a 600°K (temperaturas frecuentes en turbinas de gas) (sustituir 600 °K por 800 como temperatura superior)
- Corregida la función que muestra impacto local y regional de contaminantes primarios. Exportado a Excel estos valores

1.2 Adaptación del AIRPACTS (AGRIMAT) a las condiciones de Costa Rica

- Cambio del dominio por defecto (2000 x 2000 km con celdas de 100 x 100), a uno menor más adecuado de 20 x 20 km con celdas de 1 x 1.

1.3 Propuestas de cambios al AIRPACTS (salud) aun no implementadas

- Mantener el valor del Índice Básico de Incidencia cuando se edita la pendiente de las Fer
- Dar los resultados del impacto también en un rango (como los costos)
- Rejilla flexible

1.4 Opciones implementadas en AIRPACTS no incluidas en la versión oficial del OIEA solicitadas por Costa Rica

- Opción que permite evaluar externalidades en la salud a partir de las concentraciones obtenidas por un modelo de dispersión local de contaminantes diferente al que el utiliza (ISCLT) o el mismo modelo ISCLT con otras opciones.

ANEXO IV: DATOS METEOROLOGICOS

1.1 Opciones en AIRPACTS

1. Ningún dato meteorológico está disponible
2. Datos meteorológicos estadísticos
3. Datos meteorológicos horarios:
 - Excluyendo categoría de estabilidad y altura de la mezcla
 - Incluyendo categoría de estabilidad y altura de la mezcla

*In situ o de la estación meteorológica más cercana localizada en una zona con características geográficas y climatológicas similares recomendada por el Servicio Meteorológico Nacional.

En caso que se utilicen datos meteorológicos (opciones 2 y 3) se necesita la **altura del anemómetro**

1.2 Datos meteorológicos estadísticos:

- Temperatura ambiente media anual: Kelvin (Celsius + 273)
- Velocidad media del viento: 0 m/s
- Categorías de estabilidad especificadas como % de ocurrencia (fracción de tiempo) en el período de estudio. La suma debe ser igual a 100%.

1.3 Datos meteorológicos primarios usados por SIMPACTS/ ISCLT2.

Los datos pueden ser horarios, tri-horarios, seis-horarios, el programa correrá de todas formas pero la validez de los resultados será menor mientras más espaciados estén los datos. Esto es desde el punto de vista de las externalidades, los requerimientos regulatorios para los modelos de calidad del aire son otra cosa, por ejemplo la EPA, exige al menos 5 años de datos representativos o un año de datos in situ, pero para las externalidades no hay nada regulado en ninguna parte. Los datos meteorológicos primarios se encuentran en la parte superior de la Tabla 22

Tabla 22: Datos meteorológicos requeridos por el SIMPACTS/ISCLT2

<ul style="list-style-type: none"> Datos meteorológicos primarios 								
93	1	1	1	110	0.60	295.0		
93	1	1	2	110	1.10	294.9		
93	1	1	3	110	0.60	294.7		
93	1	1	4	100	0.60	294.6		
93	1	1	5	100	0.60	294.3		
93	1	1	6	120	0.60	294.3		
93	1	1	7	110	0.60	294.1		
<u>Incluye:</u>								
<ul style="list-style-type: none"> Año, Mes, Día, Hora, Dirección del viento en grados(desde donde sopla el viento), Velocidad del viento en m/s y Temperatura ambiente en K 								
<ul style="list-style-type: none"> Datos meteorológicos primarios más Categoría de estabilidad atmosférica y altura de la capa de mezcla 								
93	1	1	1	110	0.60	295.0	3	800
93	1	1	2	110	1.10	294.9	3	800
93	1	1	3	110	0.60	294.7	6	200
93	1	1	4	100	0.60	294.6	6	200
93	1	1	5	100	0.60	294.3	6	200
93	1	1	6	120	0.60	294.3	6	200

93	1	1	7	110	0.60	294.1	6	200
<u>Incluye:</u> Año, Mes, Día, Hora, Dirección del viento en grados, Velocidad del viento en <i>m/s</i> , Temperatura ambiente en <i>K</i> , Categoría de estabilidad atmosférica, altura de la capa de mezcla (m)								

Si se utiliza el fichero mostrado en la parte superior de la Tabla 22, el AIRPACTS calcula la estabilidad atmosférica y la Altura de la mezcla de forma muy simplificada según la Tabla 23.

Tabla 23: Método incluido en el SIMPACTS para estimar las categorías de estabilidad

Velocidad del viento	Clase de estabilidad atmosférica (Clase de Pasquill)	Altura de la mezcla (m)
Día-Alta insolación*		
0-2m/s	A(muy inestable)	1600
2-3m/s	B(inestable)	1200
3-5m/s	C(ligeramente inestable)	800
> 5m/s	D(neutral)	560
Día-Baja Insolación		
0-2m/s	B	200
2-3m/s	C	800
3-5m/s	D	560
> 5m/s	D	560
Noche		
0-2m/s	F(estable)	200
2-3m/s	F(estable)	200
3-5m/s	E(ligera estabilidad)	320
> 5m/s	D(neutral)	560
Nublado	D	560

- *La insolación depende de la posición del sol respecto al horizonte (ángulo de altitud solar α). Se considera insolación alta en las horas del día cuando $\alpha > 45^\circ$. En la noche, α es negativo.

El SIMPACTS también acepta un fichero de datos meteorológicos como el que aparece en la parte inferior de la Tabla 22. Esto implica calcular la estabilidad y la altura de la capa de mezcla por algún otro método más exacto.

Existen varios métodos mucho más detallados para calcular la estabilidad, uno muy aplicado es el de Turner pero hay que evaluar si se puede aplicar algún otro dada sus condiciones (disponibilidad de datos sobre todo). Método de radiación solar, los métodos que consideran la desviación estándar de la dirección horizontal del viento ó del ángulo de elevación del viento y el método basado en los gradientes verticales de temperatura. Estos se formularon para ser usados cuando la nubosidad no está disponible y eliminan las subjetividades que introducen los observadores en la determinación de la cantidad de cielo cubierto y la altura de la base de la capa de nubes.

Tabla 24: Método de Turner para estimar la estabilidad atmosférica.

Velocidad del viento U (m/s)	Día: Insolación				Cielo cubierto: Nubosidad 10/10, altura < 2133.6 m	Noche: Nubosidad	
	Fuerte, $\alpha > 60^\circ$	Moderada, $35 < \alpha < 60^\circ$	Ligera, $\alpha < 35^\circ$	Débil, $\alpha < 15^\circ$		$> 4/10$	$\leq 4/10$
0-0.77	A	A	B	C	D	F	F
0.77-1.80	A	B	B	C	D	F	F
1.80-2.83	A	B	C	D	D	E	F
2.83-3.34	B	B	C	D	D	E	F
3.34-3.86	B	B	C	D	D	D	E
3.86-4.89	B	C	C	D	D	D	E
4.89-5.40	C	C	D	D	D	D	E
5.40-5.92	C	C	D	D	D	D	D
≥ 5.92	C	D	D	D	D	D	D

Durante el día, la categoría de estabilidad es la obtenida de la tabla anterior si la nubosidad $\leq 5/10$. En caso contrario, se modifica el grado de insolación según los siguientes criterios:

- Si la altura de la base de las nubes < 2133.6 m, disminuir dos grados de insolación.
- Si la altura de la base de las nubes ≥ 2133.6 m y < 4876.8 m, disminuir un grado de insolación.
- Si la nubosidad = 10/10 y la altura de la base de las nubes está entre 2133.6 m y 4876.8 m, disminuir dos grados de insolación, si la altura de la base de las nubes ≥ 4876.8 m entonces disminuir solo uno
- Si por las modificaciones anteriores, el grado de insolación debiera ser menor que Débil, mantenerlo como débil.

La altura de la capa de mezcla es relativamente fácil de calcular si se tienen los datos de sondeo de aire superior. El método regulatorio de la EPA es el de Holzworth y hay un programa en la página web de la EPA para esto que se podría usar y después es necesario otro para interpolar pues por el método de Holzworth se obtiene solo una altura mínima y máxima. El programa de interpolación también está en la página de la EPA, PCRAMMET. Para usarlo como está necesitan que sus datos meteorológicos estén en el formato de Estados Unidos, sino es necesario preparar una subrutina para los formatos de la **Tabla 22**. El Servicio Meteorológico debe estar al tanto de las metodologías aceptadas en el país.

TERMINOS DE REFERENCIA

Contratos No 5907

1. **Duración:** 1.25 mes/persona de trabajo efectivo
2. **Finalidad de la consultoría:** Completar trabajo previo en evaluación de Externalidades con cinco casos de aplicación y preparar la publicación de los resultados
3. **Actividades a realizarse:**
El consultor deberá realizar las siguientes actividades:
 1. REVISAR la información requerida para evaluar las Externalidades en cinco sitios de Costa Rica, identificados por el Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE)
 2. ASESORAR a los funcionarios de Costa Rica para que realicen la evaluación de las Externalidades en dichos sitios
 3. Preparar el informe

REFERENCIAS

- ¹ Spadaro, 1999. Quantifying the Health Impacts of Air Pollution, Prepared for the International Atomic Energy Agency, Planning and Economics Studies Section, Nuclear Division, Vienna, Austria
- ² Brunekreef B, Hoek G. The relationship between low-level air pollution exposure and short-term changes in lung function in dutch children. *JEAAE*, 1993, 3(Suppl 1):117-28
- ³ Schindler C, Ackermann-Liebrich U, Leuenberger P, Monn Ch. Associations between lung function and estimated average exposure to NO₂ in eight areas of Switzerland. *Epidemiology* 1998; 9(4):405-11.
- ⁴ World Health Organization. Health and environment in sustainable development. Five years after the Earth Summit. Executive summary. Geneva: WHO, 1997: 9-30.
- ⁵ Organización Panamericana de la salud. (2000) La salud y el ambiente en el desarrollo sostenible. OPS Publicación Científica No. 572, Washington, D.C., 2000
- ⁶ Molina E, Barceló C, Bonito L A, Puerto C. (1996) Factores de riesgo de cáncer pulmonar en Ciudad de La Habana. *Rev Cubana Hig Epidemiol*; 34(2):81-90.
- ⁷ World Health Organization. (1992) Our Planet, Our Health. Report of the WHO Commission on Health and Environment. Geneva.
- ⁸ Koren HS. Associations between Criteria Air Pollutants and Asthma. *Environmental Health Perspectives* 1995; 103(6):235-42.
- ⁹ Ostro B, 1996, A methodology for estimating air pollution health effects, Geneva: WHO
- ¹⁰ Goldsmith J, Abramson M, Friger M. (1996) Associations between health and air pollution in time-series analyses. *Archives of Environmental Health*; 51(5): 359-67.
- ¹¹ Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB). (2000) Relatório de qualidade do ar no Estado de São Paulo – 1999. São Paulo: CETESB, 2000:13.
- ¹² Organización Sanitaria Panamericana. Epidemiología ambiental. (1994) Un proyecto para América Latina y El Caribe. Contaminantes atmosféricos. México (DF): OPS: 57-85.
- ¹³ World Health Organization. (2000) Regional Office for Europe. Air Quality Guidelines for Europe. Second Edition. Copenhagen..
- ¹⁴ World Health Organization. (1999) Environmental epidemiology. Geneva.
- ¹⁵ Dockery D, Pope CI, Xiping J, Spengler J, Ware M, Ferris B, Speizer F (1993). "An association between air pollution and mortality in six US cities". *New England J of Medicine*, vol.329, p.1753-1759.
- ¹⁶ Pope C, Thun M, Namboodiri M, Dockery D Evans J. (1995) Particulate air pollution as a predictor of mortality in a prospective study of US adults. *Am J Respir Crit Care Med*; 51:699-74.
- ¹⁷ Zmirou D, Balducci F, Dechenaux J, Piras A, Filippi F, Benoit-Guyod JL (1997). Méta-analyse et fonctions dose-réponse des effets respiratoires de la pollution atmosphérique. *Rev Epidemiol Sante Publique*, 45(4):293-304.
- ¹⁸ Health Effects Institute (2003) Revised analyses of the national morbidity, mortality, and air pollution study, Part II. Revised analyses of selected time-series studies. URL: <http://www.healtheffects.org>.
- ¹⁹ European Commission, (1995) Directorate-General XII, Science Research and Development. ExternE: Externalities of Energy. Vol.2 Methodology. Bruxelles: EC.
- ²⁰ EPA, 1995a, Screening Procedures for Estimating the Air Quality Impact of Stationary Sources, Revised. EPA-450/R-92-019, U.S
- ²¹ Rabl A, 2002, AIRPACTS exposure response functions. Austria: International Atomic Energy Agency.
- ²² APHEA (1997). Short-term effects of Air Pollution on Health: a European Approach to methodology, dose response assessment and evaluation of public health significance. APHEA project: brief summary of results. <http://airnet.iras.uu.nl/products/index.php>
- ²³ Ecosistema Urbano y Salud (ECOURS) de los habitantes de la zona metropolitana de México, 2000.
- ²⁴ Centro de Investigación en Contaminación Ambiental de la Universidad de Costa Rica. "Participación del Laboratorio de Calidad de Aire en el Plan Piloto Nacional de Vigilancia de la Calidad del Aire (UCR-UNA-MinSALUD)

-
- ²⁵ Anderson HR, Spix C, Medina S, Schouten JP, Castellsague J, Rossi G, Zmirou D, Touloumi G, Wojtyniak B, Ponka A, Bacharova L, Schwartz J, Katsouyanni K (1997). "Air pollution and daily admissions for chronic obstructive pulmonary disease in 6 European cities: results from the APHEA project". *Eur Respir J*. 1997 May;10(5):1064-71
- ²⁶ G Touloumi, K Katsouyanni, D Zmirou, J Schwartz, C Spix, AP de Leon, A Tobias, P Quennel, D Rabczenko, L Bacharova, L Bisanti, JM Vonk and A Ponka (1997). Short-term effects of ambient oxidant exposure on mortality: a combined analysis within the APHEA project. *Air Pollution and Health: a European Approach*. *American Journal of Epidemiology*, Vol 146, Issue 2 177-185, Copyright © 1997 by Oxford University.
- ²⁷ Sheridan, P.J., C.A. Brock, and J.C. Wilson, "Aerosol Particles in the Upper Troposphere and Lower Stratosphere: Elemental Composition and Morphology of Individual Particles in Northern Midlatitudes, "Geophysical Research Letters", 21, 2587-2590 (1994)
- ²⁸ Milford, J. B. and Davidson, "The Sizes of Particulate Sulfate and Nitrate in the Atmosphere – A Review". *Journal of the Air Pollution Control Association*. 37, 125-134 (1987).
- ²⁹ Anuario Estadístico de la CCSS 2002.
- ³⁰ Stiep, D. M. et al: Economic evaluation of the benefits of reducing acute cardiorespiratory morbidity associated with air pollution, en *Environmental Health: A Global Access Science Source* 2002, I:7 © 2002 Stieb et al: license BioMed Central Ltd. Open Access article, tomado de <http://www.ehjournal.net/content/1/1/7>
- ³¹ Anil Markandya and Richard Boyd (2002). "AIRPACTS ECONOMIC VALUATION (Version 1.0): 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 (IAEA). Vienna. Austria. October 2002
- ³² World Development Indicators 2004.
- ³³ Proposed Guidance for Air Dispersion Modeling, Project Number: SSB-034875, November 10, 2003, Submitted By: Lakes Environmental Consultants Inc to Ontario Ministry of the Environment, Project Director – Dr. Jesse Thé, Project Manager – Mark Hilverda