



# Modelos de Evaluación Integrada del impacto del cambio climático. Algunas consideraciones sobre un modelo para la región del Caribe

---

Yeniley Allegue Losada\*

Con el objetivo de realizar una evaluación económica del impacto del cambio climático, han sido estudiadas y aplicadas varias alternativas, entre ellas las más utilizadas han resultado ser los Modelos de Evaluación Integrada del impacto del cambio climático. Sin embargo, estos modelos globales muestran resultados dudosos para el caso de los pequeños Estados insulares en desarrollo, cuyas estrategias de adaptación se ven fuertemente afectadas debido, en lo fundamental, a sus posibilidades físicas y económicas limitadas. De igual manera, se aprecia que en los modelos disponibles hasta el momento, los datos de entradas y las salidas vienen dados por regiones o son globales, impidiendo derivar conclusiones para el área del Caribe. Por tanto, una evaluación integrada del impacto del cambio climático para el Caribe, deberá incluir aspectos no considerados hasta ahora que respondan a las particularidades de la región. Como resultado, el trabajo estará encaminado a mostrar qué características y elementos esenciales deberá reunir un modelo de evaluación integrada del impacto del cambio climático para la región del Caribe.

## Introducción

EL CAMBIO CLIMÁTICO se ha convertido en uno de los problemas más generalizados que afectan actualmente a la humanidad, constituyendo una grave amenaza al medio ambiente que exige acciones globales de carácter urgente.

---

\* Facultad de Economía, Universidad de La Habana.

Tal como lo muestran diferentes informes del Panel Intergubernamental del Cambio Climático, es un hecho científico que el clima global está siendo alterado significativamente. Como consecuencia, se estiman variaciones en los patrones de precipitación global y corrientes marinas. Asociados a estos potenciales cambios se producirán grandes alteraciones en los sistemas físicos y biológicos en muchos entornos acuáticos, terrestres y marinos a nivel global. Por tanto, resulta incuestionable que el cambio climático amenaza en la actualidad elementos tales como la salud humana, el uso de la tierra, la producción de alimentos, el agua, el suelo, los recursos forestales, la biodiversidad, los recursos costeros y la infraestructura.

La creciente preocupación internacional por este fenómeno se debe a que se espera se produzca en un plazo de tiempo relativamente tan corto, que no permita la necesaria adaptación de los ecosistemas naturales y los sistemas socio-económicos existentes actualmente.

En el caso específico de la región del Caribe, esta problemática adquiere significación pues los países que la conforman, por su condición insular, son altamente vulnerables al cambio climático global.

Dada esta realidad, y aún cuando los países caribeños no se encuentren entre las principales naciones emisoras de gases que causan el efecto invernadero, y por lo tanto, no tienen mucho peso en la solución del problema a nivel mundial, los mismos necesitan tomar precauciones para afrontar las posibles restricciones futuras. El Caribe debe trabajar no sólo en la reducción de las emisiones de gases efecto invernadero, sino también en la adaptación al cambio climático. En este sentido, resulta necesario un modelo de evaluación integrada de carácter regional cuya aplicación contribuya a aumentar los conocimientos sobre el impacto del cambio climático en el Caribe.

El propósito del presente trabajo consiste en analizar los principales modelos de evaluación integrada referenciados en la literatura existente, y derivar conclusiones sobre un modelo que se ajuste a las características y particularidades de la región del Caribe. El análisis se expone en dos epígrafes. El primero brinda una introducción al tema de la evaluación integrada del impacto del cambio climático. Además presenta una visión general de los tres modelos de evaluación integrada más referenciados en la literatura y utilizados en los estudios sobre evaluación de impactos (PAGE, FUND, RICE), haciendo énfasis en las características y particularidades más relevantes de los mismos no solo

desde el punto de vista ambiental, sino también social y económico, así como los requerimientos computacionales de los mismos. El último epígrafe hace énfasis en los principales elementos que debe abordar un modelo de evaluación del cambio climático para el Caribe, basado en las características físicas, ambientales, económicas y sociales de la región. Finalmente se relacionan los resultados y conclusiones más significativos.

## **Modelos de Evaluación Integrada del impacto del cambio climático.**

La preocupación por las consecuencias que puede ocasionar el inminente cambio climático global, se ha traducido en un notable y creciente interés por los fenómenos climáticos, y su evolución temporal y espacial desde ámbitos no solo científicos, sino también políticos y económicos, siendo asunto de investigación y debate entre las ciencias naturales, económicas y sociales.

Con el objetivo de analizar y evaluar los impactos del cambio climático han sido creados y aplicados diferentes tipos de modelos tanto científicos como económicos, siendo posible citar algunos de ellos: modelos de equilibrio general computable, de optimización de sistemas de energía, modelos macroeconómicos, y los llamados modelos de evaluación integrada, que resultan ser uno de los más utilizados a nivel internacional.

Según el IPCC (International Panel of Climate Change) la evaluación integrada es un proceso interdisciplinario consistente en combinar, interpretar y comunicar conocimientos de diversas disciplinas científicas de tal manera que sea posible sopesar y considerar todos los aspectos importantes de una cuestión social compleja como aporte al proceso de decisión<sup>1</sup>.

El hecho de que el cambio climático es esencialmente un fenómeno complejo por el entramado de reacciones que implica, hace de los modelos de evaluación integrada un instrumento de gran utilidad. Estos

---

<sup>1</sup> IPCC (2007). Cambio Climático 2007: Impacto, Adaptación y Vulnerabilidad. Contribución del Grupo de Trabajo II al Cuarto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático. Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de Naciones Unidas para el Medioambiente (PNUMA).

modelos combinan información sobre importantes aéreas para la evaluación al caracterizarse por integrar tres elementos claves de los impactos del cambio climático: el medio ambiente, la energía y la economía. El objetivo de este tipo de modelos va dirigido a comprender la estrecha relación existente entre los gases de efecto invernadero y el comportamiento de los impactos y los costos de reducción de emisiones. De igual manera, los modelos proporcionan a los gobiernos una síntesis coherente de los diversos aspectos involucrados en este fenómeno global permitiendo una mejor comprensión de los impactos y resultados futuros. Además, contribuyen a la evaluación de diferentes políticas dando luces sobre cuáles estrategias de adaptación resultan ser las más adecuadas en el país o región analizado, permitiendo enfocar los esfuerzos a la minimización de los impactos en el área.

En la actualidad existen varios modelos de evaluación integrada del cambio climático como es posible apreciar en la siguiente tabla.

**Tabla 1. Modelos de Evaluación Integrada**

<b>Modelo</b>	<b>Tipo de modelo</b>	<b>Referencia</b>
MARKAL	Global energy system	Barreto et al., 2004a
ERIS	Energy system optimisation	Barreto et al., 2004b
R&DICE	IAM	Nordhaus, 2002
DEMETER	Computable general equilibrium	Gerlagh et al. 2003
MERGE	IAM	Kypreos, 2004
ENTICE	Macroeconomic model	Popp, 2004
WIAGEM	IAM	Kemfert, 2005
MESSAGE	Energy engineering optimisation	Grubler & Al. 1998
FUND	IAM	Richard Tol,
MIND	Macroeconomic model	Edenhofer, 2005
PAGE2002 (Modified)	IAM	Stephan Alberth, Chris Hope, 2006

**Fuente:** Elaboración propia a partir de Stephan Alberth, Chris Hope, 2006 (b).

A pesar de la gran variedad de modelos de evaluación integrada, se destacan entre ellos, por ser los que más frecuentemente son citados en la literatura y los más utilizados los siguientes: PAGE2002 (Policy

Analysis of the Greenhouse Effect 2002) desarrollado por Chris Hope de la Universidad de Cambridge; RICE (Regional Dynamic Integrated model of Climate and the Economy), propuesto por William Nordhaus de la Universidad de Yale; y el FUND (Climate Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution), desarrollado por Richard Tol de la Universidad de Hamburgo.

Es necesario señalar que cada uno de estos modelos de evaluación integrada no proveen una respuesta definitiva a todas las interrogantes del cambio climático, pues esto no es posible dado la inherente incertidumbre que caracteriza este fenómeno global. Sin embargo, proveen una descripción del estado del arte de los impactos y brindan respuestas internamente consistentes, lo que muestra la utilidad y fortaleza de estos modelos en aras de dar respuestas al cambio climático global.

A continuación se hará referencia a las características y particularidades de cada uno de los modelos anteriormente referenciados.

## **Modelo de Evaluación Integrada PAGE 2002**

El PAGE2002 (Policy Analysis of the Greenhouse Effect 2002) es un modelo estocástico de evaluación integrada del cambio climático que incorpora un número importante de ecuaciones para replicar las complejas interacciones ambientales y económicas que se producen con el cambio climático, por tanto su gran fortaleza radica en su flexibilidad para evaluar diferentes escenarios de desarrollo.

El modelo PAGE2002 usa distribuciones triangulares y numerosas simulaciones para calcular los costos y los impactos de los diferentes escenarios de estabilización. El modelo incluye diez diferentes intervalos de tiempo espaciados a lo largo de 200 años, desde el 2000 hasta el 2200 (tabla 2). Utiliza pequeños pasos temporales al principio y más largos en los intervalos finales, de tal forma que los pasos temporales varían con el tiempo y van desde uno hasta 50 años. El objetivo es concentrar el esfuerzo computacional en los primeros años dado que las emisiones calculadas se hacen menos precisas con el tiempo. De igual manera se considera que las emisiones de los últimos años de evaluación tienen una pequeña influencia sobre los costos y en el aumento de la temperatura global para el 2200.

**Tabla 2. Intervalos de tiempo**

<b>Intervalos</b>	<b>Año</b>
0	2000 (año base)
1	2001
2	2002
3	2010
4	2020
5	2040
6	2060
7	2080
8	2100
9	2150
10	2200

**Fuente:** Elaboración propia a partir de Alberth, S., Hope, C. , 2006 (a).

El modelo divide el mundo en ocho regiones (Unión Europea (región focal), Estados Unidos de América, Otras naciones OECD, África y Medio Oriente, China y Asia Central, India y Sudeste Asiático, América Latina y la Ex Unión Soviética y Europa del Este). Además, considera tres diferentes gases de efecto invernadero dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) y hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>). El PAGE2002 considera la acumulación de gases de efecto invernadero en la atmosfera y el consiguiente aumento de la fuerza radioactiva, mediante la utilización de una relación logarítmica entre la concentración y la fuerza radioactiva por CO<sub>2</sub>, un método de raíz cuadrada para el metano y un método lineal para el hexafluoruro de azufre.

Para las ocho regiones consideradas, los cambios en la temperatura son estimados a partir del forzamiento radioactivo para los tres gases de efecto invernadero y los aerosoles de sulfatos. A su vez, el modelo no calcula la elevación del nivel del mar ni las precipitaciones.

El impacto del cambio climático en cada año de análisis es modelado como una función polinómica del incremento regional de la temperatura de ese año sobre un nivel tolerable de cambio de temperatura tiempo-variante  $(T - T_{\text{tolerable}})^n$ , donde n es un parámetro

de entrada indeterminado. Los impactos son agregados usando tasas de descuento variables en el tiempo. (Hope, 2007)

Además, los impactos son evaluados como porcentaje de pérdidas del PIB anual en cada región, definidos como impactos tangibles (impactos económicos sobre sectores que son directamente incluidos en el PIB) e impactos intangibles (impactos ambientales y sociales que no son directamente incluidos en el PIB). La estimación de impactos, tanto para los tangibles como para los intangibles, es realizada a nivel de costos de manera global y sin diferenciar sectores.

Los costos de adaptación son calculados por región. La adaptación al cambio climático es considerada mediante las inversiones en medidas de adaptación que pueden incrementar el nivel tolerable de cambios de temperatura ( $T_{tolerable}$ ) antes de que ocurran las pérdidas económicas, y además que reduzcan la intensidad de los impactos tanto económicos como no económicos.

El modelo también considera la posibilidad de discontinuidades o sucesos singulares futuros a gran escala, mediante una probabilidad de discontinuidad linealmente creciente que reduce sustancialmente el Producto Interno Bruto cuando se producen incrementos de la media global de temperatura por encima de un nivel tolerable. De esta forma, el modelo es capaz de evaluar los impactos resultantes de eventos climáticos extremos.

PAGE2002 evalúa adicionalmente dos posibles efectos de retroalimentación del clima: debilitamiento de los sumideros de carbón al alterarse la tasa de absorción de carbón por las plantas e incremento de las emisiones naturales de metano al derretirse el permafrost (Turtós, 2008).

En el PAGE2002 los costos están directamente asociados a las propias reducciones de emisiones. El cálculo comienza con la asignación a cada región de una senda de emisión, tal y como queda descrito en el escenario que es modelado, y que es comparado con el escenario BAU (Business as usual). Las reducciones realizadas por cada región es la diferencia entre estas dos sendas de emisión. Usando un set de costos unitarios fijos asociados con la reducción, el modelo usa esta información para calcular los costos totales de reducción, los costos de adaptación y los impactos causados por el cambio climático inducido por el nivel de emisiones del escenario. (Alberth, Hope, 2006, a). El PAGE2002 es muy sensible al método de descuento usado. El modelo

permite para tasas de descuento variables en cada periodo de tiempo y región, calcular una tasa de descuento ( $dr_{r,i}$ ) usando una función de crecimiento optima de tipo Ramsey (Cline, 2004) con una tasa pura de preferencia de tiempo ( $ptp$ ) como se observa a continuación.

$$dr_{r,i} = ptp + e_u \bullet (g_{r,i} - p_{r,i})$$

Donde “ $e_u$ ” representa la elasticidad de la utilidad marginal del consumo y “ $g$ ” y “ $p$ ” muestran las tasas de crecimiento del Producto Interno Bruto y la población respectivamente, con variables indexadas por región “ $r$ ” y periodos “ $i$ ”. (Alberth, Hope, 2006, a)

Finalmente, los costos totales de un escenario de reducción comparado con el escenario BAU pueden entonces ser confrontados con la reducción total de impactos (impactos ganados). La diferencia de estos dos valores representa el Valor Presente Neto (NPV) de la estrategia de adaptación, teniendo en cuenta que un valor positivo NPV significa que los beneficios descontados pesan más que los costos descontados. (Hope, 2006, b)

La característica estocástica del PAGE2002 es diseñada para captar la incertidumbre que permanece debido a la naturaleza aleatoria del fenómeno analizado, los rangos de datos se obtienen utilizando la técnica de muestreo Latin Hypercube generado a través del “@Risk” y “Risk Optimiser”, aplicaciones instaladas encima de una plataforma Excel existente (Palisade). Estos programas diseñados específicamente para la modelación estocástica, le permiten al usuario definir el tipo de distribución a usar para todas las entradas del modelo. El modelo simula los resultados ejecutando un número fijo de iteraciones y presenta resúmenes estadísticos de los coeficientes de correlación entre las entradas del modelo y las diferentes salidas del mismo (Alberth, Hope, 2006, a).

De esta forma, al emplear distribuciones de probabilidad para variables económicas y ambientales de entrada en vez del valor medio esperado, el modelo calcula un rango y no el supuesto mejor resultado (un valor puntual) para salidas como las temperaturas, los impactos y los costos. Lo anterior, unido a la iteración de miles de diferentes posibles resultados, le permite al modelo evitar un error que es muy común, y es el de asumir linealidad entre las entradas y las salidas cuando en realidad el modelo es no lineal. Como resultado, el PAGE2002 puede

esclarecer parte de la incertidumbre asociada al cambio climático. El análisis de sensibilidad puede también ser utilizado para determinar que rangos de entrada tienen el efecto más importante sobre los principales resultados del modelo.

## **Modelo de Evaluación Integrada RICE**

El modelo RICE (Regional Integrated model of Climate and the Economy), desarrollado por William Nordhaus, Universidad de Yale, constituye una versión del DICE (Dynamic Integrated model of Climate and the Economy), el primer modelo de evaluación integrada sobre la economía del cambio climático. El RICE permite obtener una estimación económica por regiones de los efectos del cambio climático, al involucrar múltiples elementos entre los que se destacan factores que afectan el crecimiento económico, las emisiones de CO<sub>2</sub>, el ciclo del carbón, impactos y daños climáticos.

En el modelo RICE, las naciones son agrupadas en ocho regiones geográficas para los efectos de la modelación. Las regiones están compuestas por países con condiciones políticas y / o económicas similares, de esta forma es posible encontrar regiones compuestas por grandes países (como EE.UU. o China) o por grandes regiones (como países de Europa).

El modelo trabaja con pasos temporales de 10 años desde 1995 hasta 2335. Incorpora al análisis, variables de flujo y variables de stock, la información sobre las variables de flujo se obtiene como flujos al año, mientras que las de stock se determinan al inicio del período.

El RICE considera solamente el CO<sub>2</sub> proveniente de las fuentes industriales, por tanto el resto de los gases de efecto invernadero y aerosoles de sulfato, así como el CO<sub>2</sub> proveniente de cambios en el uso de la tierra son considerados como exógenos al modelo, de tal forma que sus efectos se evalúan como un todo considerando los análisis del IPCC.

El cambio climático está representado por la temperatura media global, calculada a partir del forzamiento radioactivo, determinado para el CO<sub>2</sub> proveniente de fuentes industriales con un término que abarca el forzamiento radioactivo de los restantes gases de efecto invernadero y el dióxido de carbono derivado de los cambios en el uso de la tierra. Además, el modelo no calcula la elevación del nivel del mar ni las precipitaciones.

El RICE asume la economía del cambio climático desde la perspectiva de la teoría del crecimiento económico al incluir las llamadas inversiones climáticas que resulten de las políticas ambientales que se sigan. El modelo incluye un capital natural del sistema climático como un tipo de stock de capital, al tiempo que considera el tradeoff entre el consumo de hoy y el consumo en el futuro. Al dedicar recursos a inversiones en capital natural para la reducción de emisiones en el presente, se reduce el consumo y la inversión productiva, es decir, se previene las economías de los daños del cambio climático al tiempo que se incrementa las posibilidades de consumo en el futuro. Por tanto, el modelo permite evaluar diferentes políticas considerando la contribución de las mismas al consumo de diferentes generaciones. Lo anterior es posible asumiendo que cada región tiene un conjunto bien definido de preferencias que determina la trayectoria de consumo e inversión en el tiempo, y es representada mediante una función de bienestar social. Se combina el bienestar de generaciones diferentes usando esta función de bienestar social, la cual aumenta en la medida que se incrementa el consumo per cápita de cada generación, tendencia que es acompañada con una reducción de la utilidad marginal del consumo. A su vez, la importancia relativa entre las diferentes generaciones es considerada mediante una tasa de preferencia temporal pura que favorece las generaciones actuales en relación con las futuras. Se asume que las naciones maximizan su función de bienestar social sujeto a varias restricciones económicas y geofísicas. En este sentido, las variables económicas de decisión que están disponible son el consumo, la tasa de inversión en capital tangible, y las inversiones en el clima, principalmente las destinadas a reducción de las emisiones de gases efecto invernadero.

El RICE se caracteriza por tener un módulo geofísico diseñado para modelar el cambio climático, y un sector económico tradicional, similar al encontrado en muchos modelos económicos. En este último sector se asume que cada región o país produce un solo artículo que puede usarse tanto para el consumo como para la inversión, de esta forma todos los cambios en el bienestar, incluyendo los que se deben al cambio climático, son reflejados en la definición de consumo de este artículo. Además, no se considera

el comercio de bienes o capital, pero en ciertos casos los países comercian bonos de carbono a cambio de bienes de consumo.

Cada región es dotada con una cantidad inicial de capital y trabajo, y un nivel inicial de tecnología. Los cambios en el crecimiento de la población y la tecnología son exógenos al modelo, mientras la acumulación del capital es determinada optimizando el flujo del consumo en el tiempo.

Se define la “energía del carbono”, como un nuevo factor en el Producto Interno Bruto (PIB). La misma se asocia a los servicios energéticos que se derivan del consumo de combustible fósil y está determinada por el contenido de carbono de todo el combustible fósil consumido. Así, en la “energía del carbono” se considera toda la energía obtenida a partir de los diferentes tipos de combustible fósil, ponderando de acuerdo con el contenido de carbono de los mismos. El PIB sigue la forma funcional Cobb–Douglas, con rendimientos constantes a escala: en el capital, la fuerza laboral y la energía del carbono. Los cambios tecnológicos son de dos tipos: los que se refieren a la economía en general y los que representan una disminución de carbono. Los primeros son neutrales tipo Hicks mientras que los segundos se modelan como una reducción en la proporción de emisiones de CO<sub>2</sub> como parte de la entrada denominada energía del carbono. Por conveniencia, tanto la energía del carbono como las emisiones industriales se miden en unidades de carbono. (Turtós, 2008)

La función de producción se calcula usando datos de uso y costos de la energía, y las elasticidades precio del uso de la energía. Lo anterior conduce a una función de costos de reducción de carbono con basamento empírico.

En el RICE, se introduce una curva de oferta de carbono. El modelo contiene una curva de oferta de combustible fósil disponible a costos crecientes, es decir, la existencia de una cantidad limitada de este combustible provoca con el tiempo escasez, de ahí la existencia de costos crecientes (renta de Hotelling).

La parte medioambiental del modelo involucra varias relaciones geofísicas que contiene las diferentes fuerzas que afectan el cambio climático. El modulo ambiental utiliza los resultados de los modelos climáticos para proyectar el cambio climático en función de las emisiones de gases de efecto invernadero. Esta parte contempla un ciclo del carbono,

una ecuación de forzamiento radioactivo, ecuaciones de cambio climático y una relación de daño climático. Los sectores geofísicos son representaciones simplificadas de modelos más complejos.

Para estimar los flujos de carbono, el modelo emplea un enfoque estructural mediante la aplicación a los ciclos de carbono existentes de un modelo de tres reservorios: atmósfera, biosfera/superficie oceánica y océanos profundos. (Turtós, 2008)

El modelo evalúa dos tipos de impactos sobre una base sectorial. Contempla impactos tangibles para sectores de mercado: agricultura, elevación del nivel del mar (costos de tormentas, tierras inundadas y reubicación de asentamientos humanos), silvicultura, consumo de energía y agua, construcción, pesca; e impactos intangibles para sectores de no-mercado: recreación al aire libre, zonas costeras, mortalidad por enfermedades relacionadas con el clima y la polución, y ecosistemas. Además, incluye las evaluaciones de impactos por eventos climáticos extremos. La estimación de los impactos es realizado a nivel de costos de manera global, es decir no se desagregan por sectores en los resultados.

Aunque la adaptación no se modela explícitamente sino que se considera en la función de daño, se asume que existe adaptación, en particular para la agricultura.

El RICE toma en consideración eventos extremos y discontinuidades pues calcula los impactos por incremento de los eventos extremos (catástrofes) o discontinuidades futuras a gran escala cuando se producen incrementos de temperatura de hasta 3°C y por encima de este límite, valores de temperatura donde no es posible una adaptación.

El modelo toma ciertas variables como dadas. Esto incluye, para cada región del mundo, población, stock de combustibles fósiles, y el cambio tecnológico. La mayoría de las variables son endógenas o generadas por el modelo, entre las que se destacan el producto interno bruto mundial, el stock de capital, las emisiones y concentraciones de CO<sub>2</sub>, el cambio de temperatura y los cambios climáticos. En dependencia de la política que está siendo analizada, el modelo genera una política de respuesta en términos de reducción de emisiones o impuestos de carbono.

El modelo RICE es el único de los tres modelos analizados en el presente trabajo que integra los costos y los daños regionales, y puede

ser empleado de forma directa en la evaluación de diferentes políticas para enfrentar el cambio climático sobre la base de su contribución al bienestar económico, o más bien al consumo de diferentes generaciones. Además, el RICE brinda información sobre el papel de los impuestos de carbono, elemento de gran utilidad para calibrar las diferentes políticas ambientales.

El modelo está compuesto por un número de ecuaciones matemáticas que representan el producto, las emisiones, el cambio climático, y los impactos económicos, resultado de estudios realizados por especialistas provenientes de diferentes disciplinas como la económica, la ecológica, las ciencias naturales. Estas ecuaciones corren con un software de optimización matemática que permite proyectar salidas no solo ambientales sino también económicas. El modelo posee dos tipos de implementaciones: en Excel y en GAMS, arrojando resultados muy similares, aún cuando emplean métodos diferentes para arribar a la solución.

## **Modelo de Evaluación Integrada FUND**

El modelo FUND (Climate Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution) fue originalmente desarrollado con el objetivo de analizar estrategias eficientes de reducción de emisiones para varios grupos de países, sin embargo, ha evolucionado rápidamente para estudiar los impactos del cambio climático en un contexto dinámico, de tal forma que en la actualidad, es usado regularmente para evaluar políticas climáticas de reducción de gases efecto invernadero mediante análisis de costo-beneficio y costo-efectividad, permite la incorporación de incertidumbre y, además es utilizado para apoyar investigaciones que desde la teoría de juego abordan los acuerdos medioambientales internacionales. De todos los modelos analizados en este trabajo resulta ser el más detallado, y una de sus grandes fortalezas radica justamente en la desagregación de impactos en diferentes sectores.

El FUND consiste en un conjunto de escenarios y modelos simples de población, tecnología, economía, emisiones, química atmosférica, clima, nivel del mar, e impactos. Distingue 16 principales regiones a nivel mundial (Estados Unidos, Canadá, Europa Occidental, Japón y República

de Corea, Australia y Nueva Zelanda, Europa Central y Oriental, Antigua Unión Soviética, Medio Oriente, América Central, América del Sur, Asia del Sur, Asia Sur Oriental, China y otros Estados, África del Norte, África Subsahariana, pequeñas islas).

El modelo corre en pasos temporales de un año desde 1950 a 2200. Existen dos razones para extender el período de simulación hacia el pasado. La primera está asociada a la necesidad de inicializar el módulo de impacto del cambio climático, como el modelo refleja el proceso de adaptación al cambio climático asumiendo que algunos impactos dependen de los impactos del año anterior, si no es realizada una apropiada inicialización, los impactos del cambio climático serán falseados en las primeras décadas. Por otra parte, la resolución temporal del modelo (pasos anuales) permite brindar un mayor nivel de detalle en los resultados, al tiempo que requiere de un gran esfuerzo durante el procesamiento de los datos de entrada para responder a esta exigencia.

Los escenarios exógenos involucran crecimiento económico, crecimiento poblacional, población urbana, mejoramiento autónomo de la eficiencia energética, la descarbonización del uso de la energía (mejoramiento de la eficiencia de carbón) y emisiones de óxido nítrico y metano. (Tol, 1999)

Los escenarios de crecimiento económico y de población son perturbados por los impactos del cambio climático. La población decrece por las muertes provocadas por este fenómeno global, siendo resultado de episodios de calor o frío intenso, malaria, dengue, diarrea y ciclones tropicales. Se asume que los episodios de calor y frío intenso solo afectan a los ancianos, la población no reproductora; los episodios de calor intenso sólo afectan a la población urbana. La población también cambia con la migración entre regiones que se produce como consecuencia del cambio climático. Los impactos económicos son modelados como pérdidas que reducen el ingreso disponible. Los escenarios son sólo perturbados ligeramente por los impactos del cambio climático, sin embargo, el ingreso y la población son principalmente exógenos. (Tol *et al.*, 2003)

La parte endógena del FUND involucra las emisiones de carbón, las concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono, óxido nítrico y metano, la temperatura media global, y los impactos del cambio

climático sobre las zonas costeras, la agricultura, el clima extremo, los ecosistemas naturales y la malaria. (Tol, 1999)

El modelo considera tres de los gases de efecto invernadero: dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ) y óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), además modela las emisiones de dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ). La temperatura media global es regida por un aumento geométrico hacia su equilibrio (determinado por el forzamiento radiactivo), con un tiempo de vida de 50 años. El forzamiento radioactivo es calculado para  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  y  $\text{SO}_2$ .

El nivel medio del mar también tiene un comportamiento geométrico, el equilibrio es determinado por la temperatura y un tiempo de vida de 50 años. El FUND además calcula la actividad de huracanes, las precipitaciones de invierno, la actividad de las tormentas de invierno, estos factores dependen linealmente de la temperatura media global.

El módulo de impactos tiene dos unidades de medida: personas y dinero. Las personas pueden morir prematuramente (stress de calor, malaria, ciclones tropicales) o emigrar. Estos efectos, como todos los impactos, se monetizan. El daño puede ser debido a la tasa de cambio o al nivel de cambio. (Tol, 1999)

El daño es calculado a través de un polinomio de segundo-orden en cambio climático y se encuentra determinado por impactos tangibles referidos a aquellos que se producen en sectores de mercado: agricultura, silvicultura, energía usada para refrigeración, climatización y calefacción, recursos hídricos, protección de las costas, tierras secas inundadas, arribo de inmigrantes; e impactos intangibles para considerar los que ocurren en sectores de no mercado: zonas costeras y ecosistemas, terrenos pantanosos perdidos, migración por inundaciones, así como la mortalidad y la morbilidad por enfermedades inducidas por vectores, diarrea, y cambios de temperatura.

Los daños tangibles afectan la inversión y el consumo; a través de la inversión, el crecimiento económico es afectado; a través del consumo, es afectado el bienestar. Los daños intangibles afectan el bienestar. La vulnerabilidad relativa al cambio climático varía con el desarrollo económico de muchas maneras. La importancia de la agricultura disminuye con el crecimiento per cápita del ingreso, y de igual manera la incidencia de la malaria y la inclinación a emigrar. El stress del calor crece con la urbanización.

La valoración de los impactos sobre los bienes y servicios de no mercado crecen con el ingreso per cápita. (Tol et al., 2003)

De forma general los diferentes impactos en el modelo FUND,  $I_{t,r}^d$  son una función del incremento de temperatura y de la razón de crecimiento de la economía con respecto al año base expresada por los ingresos per cápita con elasticidad  $e_r^d$  (Turtós, 2008).

$$I_{t,r}^d = f_{t,r}(\Delta T_{t,r}) \left( \frac{y_{t,r}}{y_{0,r}} \right)^{e_r^d}$$

Los costes regionales relativos se ajustan al promedio global. Esto particularmente influye en las regiones en vías de desarrollo para las cuales está disponible mucha menos información sobre los costos de reducción de emisiones. Los costos son representados por una función cuadrática, y a pesar de que son calculados y considerados en los resultados del modelo, no aparecen directamente en los ficheros de salida.

El FUND distingue diferentes generaciones de “tomadores de decisión”. Cada “tomador de decisión” tiene control sobre un período de 10 años solamente, pero se preocupa del futuro optimizando el bienestar presente neto de su región desde el comienzo del período de control hasta el 2200. Cada “tomador de decisión” conoce exactamente el esfuerzo de reducción de emisiones de “todos los tomadores de decisiones”, en todas las regiones y de todas las décadas. La distinción entre las generaciones de “tomadores de decisiones” tiene dos implicaciones. Primero, en un análisis de costo-beneficio, no solo tiene que hacer corresponder sus decisiones con las de otras regiones, sino también con las decisiones de otras generaciones. El equilibrio es encontrado iterativamente. En segundo lugar, la definición costo eficiente desaparece pues ningún “tomador de decisión” controla todo el período. (Tol, 1999)

El bienestar presente neto por región es maximizado bajo una restricción conjunta sobre las emisiones de dióxido de carbono para cada década. En los casos de cooperación, o los casos de comercio, la suma del bienestar presente neto por región es maximizado, conociendo las reducciones de emisión en otros períodos de tiempo. Si no hay restricciones de emisión, el bienestar presente neto es maximizado para

equilibrar los costos de reducción de la emisión y los costos del cambio climático, o bien por región (caso de no cooperación) o mediante la suma de las regiones (caso de cooperación). (Tol et al., 2003)

Por defecto el programa corre un escenario definido como “escenario FUND”, donde no se implementa ninguna política de reducción de emisiones en ninguna región y para ningún tiempo (escenario BAU), y no se realizan Análisis Costos Beneficio ni Análisis Costo Efectividad. Manualmente, realizando modificaciones al código fuente y recompilando, el usuario puede habilitar otras opciones: Análisis Costos Beneficios, con y sin cooperación; Análisis Costo Efectividad, con y sin cooperación. En el Análisis Costos Beneficios, las emisiones son reducidas hasta maximizar la utilidad. En los Análisis Costo Efectividad se analizan diferentes escenarios desde el punto de vista de estabilizar las concentraciones de gases de efecto invernadero minimizando los costos. (Turtós, 2008)

El tratamiento de incertidumbres es realizado mediante la aplicación del método de Monte Carlo (Tol et al., 2003), lo que constituye una de las fortalezas de este modelo.

Para correr el modelo es necesario TurboPascal 7.0 o también es posible utilizar Delphi 6.0. El FUND no tiene interface gráfica y algunos autores coinciden en que es muy poco amigable.

## **Algunas consideraciones sobre los modelos analizados**

En general, es posible encontrar pequeñas semejanzas entre los tres modelos analizados, por ejemplo todos enmarcan el análisis desde la perspectiva de países desarrollados, asumen que las naciones hacen lo que pueden por adaptarse sin un estímulo político extra, y los costos calculados (daños generados por el cambio climático, los costos de adaptación y de reducción de las emisiones) son sustraídos del PIB proyectado. De igual manera, los modelos poseen limitaciones a la hora de abordar elementos fundamentales del análisis del cambio climático como los impactos directos a la salud y la estimación de catástrofes, y en muchos casos coexisten problemas con los datos en cuanto a la desagregación de los mismos y su utilización. Lo anterior condiciona

en gran medida que la interpretación de los resultados de los modelos deba realizarse con una gran precaución.

A pesar de que tanto el FUND como el RICE y el PAGE2002, de manera individual, brindan una síntesis coherente de diferentes aspectos del cambio climático mediante una valoración integrada, cada uno de ellos tienen sus propias particularidades y características, diferenciándose en múltiples aspectos:

- La resolución regional: todos hacen su propia definición de las regiones que considerarán.
- La resolución temporal pues cada uno asume distintos períodos de tiempo.
- Los gases de efecto invernadero que incorporan en la evaluación.
- La consideración o no de posibles eventos extremos a gran escala y de la incertidumbre.
- El tratamiento de la adaptación.

De igual forma difieren en el alcance y nivel de detalle de los datos de entrada y de salidas. Además, los resultados de cada modelo dependen de cómo se agregan los impactos, aunque en todos los casos estos están dados por regiones o tienen un carácter global, por lo tanto, no ha sido posible contar hasta el momento con un modelo de evaluación integrada dirigido específicamente a la región del Caribe, que permita determinar la magnitud de los impactos del cambio climático en esta zona geográfica.

## **Consideraciones sobre un Modelo de Evaluación Integrada del impacto del cambio climático para la región del Caribe**

La región del Caribe está compuesta por un conjunto de países subdesarrollados, cuyas economías se basan fundamentalmente en actividades tales como el turismo, la pesca y la agricultura. Los países caribeños difieren en tamaño, población, condiciones sociales y económicas, e infraestructura. A pesar de la gran heterogeneidad que los caracteriza, cada uno de ellos puede ser clasificado como vulnerable

a los efectos del cambio climático, no simplemente por su tamaño físico o elevación sobre el nivel del mar, sino también debido al fuerte vínculo entre éstos elementos y otras características físicas, los recursos naturales, y las estructuras socio-económicas.

La mayoría de los países del Caribe son pequeñas islas, por tanto las aéreas costeras representan una parte relativamente importante del total de los territorios. La mayoría de la población de estas naciones vive en o cerca de las zonas costeras donde se encuentran ubicadas, además, una parte considerable de la infraestructura, hoteles, hospitales, plantas eléctricas, etc. Consecuentemente las aéreas costeras necesitan ser protegidas o corren el riesgo de significativos daños a la infraestructura. El Caribe, debido a su situación geográfica, es también relativamente más vulnerable al creciente riesgo de los huracanes y otros eventos climáticos fuertes, aunque la incidencia de estos eventos no sea homogénea en todas las naciones. A su vez, la actividad del turismo, fundamental en la mayoría de los países de la región, es sensible a las adversidades del clima, al igual que la agricultura, otro sector económico importante en estas naciones.

Mientras puede haber algunos impactos beneficiosos, los impactos adversos son más numerosos y parecen ser los más significativos. Se espera que el cambio climático tenga numerosas consecuencias en el área del Caribe. Este fenómeno global conducirá a mayores temperaturas y humedad específica, temperaturas de la superficie del mar más altas, cambios en el ciclo hidrológico, elevación del nivel del mar, y aumentos en la intensidad de los eventos extremos. Es conocido que estos cambios, pueden afectar recursos básicos de la región. El incremento de las temperaturas causa el blanqueamiento de los corales, dañan los manglares y los ecosistemas costeros, produce cambios en el stock de recursos pesqueros y pérdidas en la agricultura, y aumenta las enfermedades y la mortalidad. La elevación del nivel del mar ocasiona erosión costera y pérdida de tierra, daños en la infraestructura, y la intrusión de agua salinas en las fuentes de agua dulce. El aumento de los fenómenos meteorológicos extremos provoca inundaciones, y en general daña los ecosistemas, actividades como la agricultura y la infraestructura, y causa pérdidas de vidas humanas. En general, estos efectos pueden tener consecuencias ambientales, sociales y económicas

al impactar en sectores como el turismo, la agricultura y la pesca, provocar pérdidas de tierras costeras e infraestructura, afectar la seguridad alimentaria y energética así como la disponibilidad de agua, y ocasionar impactos directos en la salud.

A pesar de que los aumentos de temperatura, elevación del nivel del mar y el incremento de eventos meteorológicos extremos interactúan con la topografía, y con las condiciones físicas, sociales, y económicas de cada territorio generando consecuencias diferentes, es incuestionable que las naciones caribeñas son altamente vulnerables a los efectos del cambio climático. A lo anterior se une los recursos físicos y económicos limitados que caracterizan a la región y frenan las estrategias de adaptación y de mitigación en el Caribe.

Bajo este escenario, los países caribeños necesitan adaptares e implementar medidas dirigidas a minimizar los impactos. En este sentido resulta cada vez más importante la modelación de los impactos del cambio climático para ganar en claridad sobre este fenómeno en la región. Sin embargo, los modelos de evaluación integrada son modelos globales que muestran resultados dudosos para el caso de los pequeños estados insulares en desarrollo, cuyas estrategias de adaptación se ven fuertemente afectadas debido, básicamente, a sus posibilidades físicas y económicas limitadas. Se aprecia que en los modelos disponibles hasta el momento, los datos de entradas y las salidas vienen dados por regiones o son globales, es decir, son modelos con otra resolución que impide derivar conclusiones para el Caribe. Por tanto, un modelo de evaluación integrada del impacto del cambio climático tendrá que incluir elementos no considerados hasta ahora que respondan a las características de la región.

Un paso importante en este ámbito resulta ser el análisis de los modelos integrados del cambio climático referenciados en la literatura, sobre los cuales se pueden sacar conclusiones importantes para la evaluación de impactos en el Caribe.

La figura 1 muestra aquellos elementos más significativos de los modelos analizados (PAGE, RICE, FUND) y el valor de los mismos en la construcción de un modelo de evaluación integrada del cambio climático para la región del Caribe, teniendo en cuenta que el color azul representa aquellas características con un valor más alto, el rojo un valor

medio, y el blanco un valor nulo respondiendo a los elementos despreciables o inexistente en la mayoría de los casos. A continuación se relacionan los aspectos más significativos que se derivan del análisis, los cuales quedan reflejados a modo de resumen en la figura 1:

- Gases de efecto invernadero: Cada uno de los modelos analizados hace su propia elección sobre los gases que incorporará, sin embargo para el caso del Caribe, una definición de cuáles serían los gases a considerar es un poco precipitado pues este elemento estará en dependencia, fundamentalmente, de los datos con los que se disponga, a pesar de lo anterior es posible definir que la consideración solamente del CO<sub>2</sub> proveniente de fuentes industriales, como es el caso del RICE, resulta ser limitada.
- Resolución de tiempo: Este es otro aspecto que depende de la información sobre el Caribe de la cual se disponga, resulta conveniente considerar períodos anteriores como en el FUND, sin embargo la resolución temporal de este modelo resulta muy detallada (pasos temporales anuales), en este sentido habría que buscar soluciones más flexibles como la propuesta por el PAGE de pasos temporales variables entre sí.
- Temperatura: La temperatura es un elemento esencial a ser considerado por su estrecha relación con los efectos del cambio climático, y dado los incrementos de temperatura que se esperan afecten a la región del Caribe en el futuro. Su determinación a través del forzamiento radioactivo resulta ser lo más adecuado.
- Elevación del nivel del mar: La elevación del nivel del mar varía con la influencia de factores como la tasa de calentamiento, la eficiencia de la circulación oceánica, los efectos atmosféricos locales y, por tanto, no es uniforme. La elevación del nivel del mar es un elemento que queda al margen en la mayoría de los análisis derivados de los modelos de evaluación integrada existentes, siendo considerada solamente por el FUND. Dada las características de la mayoría de los países de la región, pequeñas islas rodeadas de agua donde la superficie costera constituye una parte importante del total, la estimación del crecimiento del nivel del mar debido al incremento de la temperatura y el aumento de los patrones de precipitaciones, es un elemento esencial a ser considerado en un modelo para el Caribe.

**Figura 1. Valoración de los modelos existentes**

MODELOS	FUND	RICE	PAGE2002
Gases de efecto invernadero	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O, SO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> de fuentes industriales	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , SF <sub>6</sub>
Resolución de tiempo	1950-2300 (periodos anuales)	1995-2335 (periodos de 10 años)	2000-2200 (periodos de tiempo variables entre sí)
Temperatura	Forzamiento Radioactivo		
Elevación del nivel del mar	Basado en incremento de temperatura		
Precipitación			
Calculo de Impactos	Impactos (tangible e intangibles) desagregados por sectores	Impactos agregados descontados al PIB (Impactos tangibles e intangibles)	Impactos agregados descontados al PIB (Impactos tangibles e intangibles)
Costos de adaptación	Impactos continuidad del año precedente	No explícitos (agricultura)	Para cada región
Eventos climáticos extremos			
Incertidumbres	Método de Monte Carlo		Método de Monte Carlo

Leyenda  Valor Alto  Valor Medio  Valor Nulo

Fuente: Elaboración propia.

Los escenarios de nivel del mar relativos, aquellos que brindan información sobre la subida del nivel del mar en relación con los movimientos de la superficie terrestre local, pueden resultar ser de gran

importancia para evaluar los impactos y los costos de adaptación de la región, puesto que permiten evaluar diferentes tipos de amenazas a los asentamientos humanos, los ecosistemas naturales y las zonas costeras. Si bien algunos componentes de la elevación del nivel del mar en el futuro se pueden modelar en el plano regional utilizando modelos acoplados de océano-atmósfera, sería conveniente analizar la conveniencia de utilizar aquellos estudios que han comenzado a expresar la futura subida del nivel del mar en términos probabilísticos facilitando su evaluación mediante el riesgo de exceder un umbral crítico de impacto.

- **Precipitación:** Este es otro elemento primordial a ser considerado en el modelo, sobre todo porque estudios realizados hasta el momento a través de modelos como PRECIS (Providing Regional Climates for Impacts Studies) corrido para la región de Centroamérica, México y el Caribe con el objetivo de evaluar los impactos del cambio climático e identificar medidas de adaptación en la región, no ofrecen información concluyente sobre el futuro comportamiento de las precipitaciones anuales en el área del Caribe como consecuencia del calentamiento global.
- **Cálculo de impactos:** Si bien una identificación de los impactos en tangibles (sectores de mercado) e intangibles (sectores de no mercado), tal como se aprecia en todos los modelos analizados resulta adecuado, para la región del Caribe es de gran utilidad calcular los impactos desagregados por sectores como en el FUND, dada las complejidades y heterogeneidades observadas al interior de la región. Además sería interesante que el modelo al agregar los impactos, pudiera ponderarlos en términos de equidad o de bienestar.
- **Costos de adaptación:** Es difícil llegar a conclusiones en este sentido porque cada uno de los modelos analizados trata la adaptación de una manera diferente, por tanto decir cual resulta ser el más adecuado no es posible. Lo que sí queda claro que el modelo deberá dar luz sobre qué nivel de adaptación puede asumir la región sin un estímulo político adicional (financiero, legal, etc.) y cuánto cuesta, para lo cual sería importante considerar los impactos como continuidad del año precedente y desagregarlos

por países o grupos de países con características semejantes dentro de la región.

- **Eventos climáticos extremos:** Todos los estudios sobre los impactos del cambio climático en el futuro coinciden en la alta vulnerabilidad de la región del Caribe a eventos climáticos extremos, por lo que su olvido en un modelo para el territorio caribeño resulta inconcebible. Si bien las experiencias de modelos como el PAGE2002 y el RICE en el tratamiento de eventos extremos es importante como punto de partida, resulta necesario seguir profundizando en este sentido.
- **Incertidumbre:** La incertidumbre es un aspecto importante del cambio climático, esto se debe a tres factores fundamentalmente: el desconocimiento del mecanismo de funcionamiento de este fenómeno, la naturaleza estocástica del mismo, así como la permanencia a largo plazo de la causa y su efecto. Por tanto, el método usado en el modelo debe incorporar el análisis de sensibilidad y la evaluación de impactos bajo riesgo e incertidumbre. Un análisis de este tipo debe considerar la probabilidad de los valores más probables de las variables de salida, las decisiones óptimas bajo un conocimiento imperfecto y una medida del riesgo o dispersión sobre los resultados. Por tanto, no cabe dudas que un modelo estocástico resulta ser lo más adecuado.

Junto a los elementos antes señalados derivados de la comparación del FUND, PAGE2002 y RICE, y sus posibles contribuciones a un modelo de evaluación integrada del impacto del cambio climático para la región del Caribe, se deben tener en cuenta otros aspectos igualmente importantes en la construcción de un modelo de este tipo para el Caribe:

- La evaluación de las afectaciones al capital natural y humano y sobre la infraestructura, y en qué medida las mismas repercuten en el PIB, como una aproximación cuantificable del impacto del cambio climático.
- Un estudio de la eficiencia de los presentes sistemas de energía y, fundamentalmente, la búsqueda de opciones tecnológicas que permitan la transición a la energía solar de manera costo efectiva, en condiciones de futuros sistemas energéticos para pequeñas islas.

- Los datos de entrada del modelo deberán estar asociados a información socioeconómica de la región; mientras que los datos de salida deberán considerar elementos básicos como la elevación del nivel del mar y las precipitaciones, junto a otros datos agrupados de acuerdo a los impactos del cambio climático sobre los principales sectores de la economía y aspectos de interés para la región como la infraestructura, la agricultura, la salud humana, los recursos forestales, el suministro de agua, el turismo, entre otros.
- Un adecuado instrumental interno que permita la evaluación directa de los impactos económicos y ambientales de la aplicación de diferentes políticas climáticas, permitiendo identificar cuáles estrategias de adaptación resultan ser las más adecuadas para la región.
- La utilización de escenarios del clima futuro basados fundamentalmente en las salidas del modelo de circulación general acoplado atmósfera-océano, pues el mismo proporciona la más completa representación del sistema climático de que se dispone actualmente. El modelo utiliza descripciones matemáticas de los movimientos atmosféricos y oceánicos, flujos de energía y agua para simular el clima pasado, presente y futuro. El clima pasado y presente es usado para validar el modelo. Este modelo constituye una herramienta de investigación muy útil para estudiar y simular el clima, así como para fines prácticos especialmente en predicciones climáticas mensuales, estacionales e interanuales.
- De igual manera, un modelo para el Caribe puede considerar escenarios del cambio climático de alta resolución como los obtenidos mediante modelos regionales como el PRECIS que brindan información sobre qué se debe esperar, permitiendo obtener elementos que dan luces sobre cuáles serían las mejores opciones de adaptación al cambio climático y las restricciones futuras de estas islas bajo un contexto de gran vulnerabilidad.

En general, ninguno de los elementos anteriores son definitorios ni constituyen un punto final en un estudio de este tipo, por el contrario, son un punto de partida en las discusiones y análisis dirigidos a la búsqueda y diseño de un modelo de evaluación integrada del impacto del cambio climático para la región del Caribe.

## Conclusiones

Los modelos de evaluación integrada de los impactos del cambio climático constituyen una herramienta importante en el análisis de este fenómeno global. En la literatura existente es posible encontrar múltiples modelos de este tipo, sin embargo el FUND, el PAGE y el RICE resultan ser los más utilizados y referenciados en los estudios sobre este ámbito.

Aún cuando cada uno de estos modelos presenta elementos en común, prevalecen las características individuales que marcan la diferencia entre ellos. Todos poseen fortalezas pero también debilidades a la hora de evaluar los impactos del cambio climático, por lo que es especialmente difícil sacar conclusiones sobre la supremacía de alguno de ellos sobre el resto.

Sin embargo, se puede afirmar que ninguno de los modelos analizados resulta ser adecuado para la evaluación integrada de los impactos del cambio climático en la región del Caribe, aún cuando se hace imprescindible tomar en consideración importantes elementos de estos modelos para un estudio en la región.

El análisis desarrollado en la presente investigación permite concluir que el FUND y el PAGE brindan elementos más adecuados a las exigencias de un modelo para el Caribe, aún cuando se observa la necesidad de introducir modificaciones que permitan ajustar el análisis al tipo de resultados deseado teniendo en cuenta las características y particularidades de la región.

## Bibliografía

- Alberth, S., Hope, C. *Climate modelling with endogenous technical change: Stochastic learning and optimal greenhouse gas abatement in the PAGE2002 model*. The Judge Business School, University of Cambridge, (2006)(a).
- \_\_\_\_\_. *Developing the PAGE2002 Model with Endogenous Technical Change*. The Judge Business School, University of Cambridge. (2006) (b).
- Bueno et al., Ramón “The Caribbean and Climate Change, The costs of inaction. Stockholm Environment Institute” - US Center, Global Development and Environment Institute, Tufts University. (2008).
- Cline, William R.: “Meeting the Challenge of Global Warming,” artículo preparado para el *Copenhagen Consensus Research Program*. (2004). Sitio web: [www.copenhagenconsensus.com](http://www.copenhagenconsensus.com), fecha de consulta: 20 de mayo de 2009.
- DeCanio, S.J.: *Economic Models of Climate Change: A Critique*. Palgrave Macmillan, New York, 2003.
- ECLAC (CEPAL), “Addressing the impacts of climate change: Focus on the Caribbean”, Economic Commission for Latin America and the Caribbean, 2007.
- Haites, E., D. Pantin, M. Attzs, J. Bruce and J. MacKinnon: *Assessment of the Impact of Climate Change on CARICOM Countries. Environmentally and Socially Sustainable Development - Latin America and Caribbean Region*, The World Bank, 2002.
- Hope, Chris “US climate change impacts from the PAGE2002 integrated assessment model used in the Stern report”. Judge Business School, University of Cambridge, UK, 2007.
- \_\_\_\_\_. “How deep should the deep cuts be? Optimal CO<sub>2</sub> emissions over time under uncertainty. Judge Business School, University of Cambridge, 2006.
- \_\_\_\_\_. The Marginal Impact of CO<sub>2</sub> from PAGE2002: An Integrated Assessment Model Incorporating the IPCC’s Five Reasons for Concern, *The Integrated Assessment Journal*, Bridging Sciences & Policy, Vol. 6, 2006.

- IPCC “Cambio Climático 2007: Impacto, Adaptación y Vulnerabilidad”. Contribución del Grupo de Trabajo II al Cuarto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático. Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de Naciones Unidas para el Medioambiente (PNUMA), 2007.
- Leslie, K., Centella, A., Benzanilla, A. “Assessing future climate for the caribbean using the PRECIS system outputs”. Publicación electrónica del I Congreso Internacional sobre Cambio Climático, en la VII Convención Internacional sobre Medio Ambiente y Desarrollo, La Habana, Cuba. ISBN: 978-959-304-003-7. 2009.
- Llanes, J. “Examen de la economía del cambio climático en el Caribe (second draft). Expert meeting on review of the economics of climate change in the caribbean”. ECLAC (CEPAL), Department for International Development. 2009.
- Nordhaus, William D. “A Question of Balance: Economic Modeling of Global Warming”. New Haven, Yale University Press, 2008.
- \_\_\_\_\_. “Accompanying Notes and Documentation on Development of DICE-2007” Model: Notes on DICE-2007. delta.v8 as of September 21, 2007.
- \_\_\_\_\_. “The Challenge of Global Warming: Economic Models and Environmental Policy”, sitio web: <http://nordhaus.econ.yale.edu/DICE2007.html>, fecha de consulta: 20 de mayo de 2009.
- \_\_\_\_\_. “RICE and DICE Models of Economics of Climate Change”, Yale University: Spreadsheet Versions of DICE-99 and RICE-99 models, sitio web: <http://www.econ.yale.edu/~nordhaus/homepage/dice.html>), fecha de consulta: 20 de mayo de 2009.
- Nordhaus, W.D., Boyer, J., “Roll the DICE Again: Economic Models of Global Warming”. Yale University, 2000