

ESTIMACIÓN DE LAS EMISIONES DE CARBONO A LA ATMÓSFERA A PARTIR DE MODELADO BASADO EN AGENTES

Paula S. Castesana^a, Salvador E. Puliafito^{a,b}

^a*Facultad Regional Buenos Aires, Universidad Tecnológica Nacional, Medrano 951, C.A.B.A.,
Argentina, pcastesana@gmail.com*

^b*CONICET - Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional, Medrano 951,
C.A.B.A., Argentina, epuliafito@frm.utn.edu.ar*

Palabras Clave: Modelado basado en agentes, emisiones de CO₂, carbono atmosférico, dinámica poblacional.

Resumen. A nivel global, los niveles crecientes de consumo de energía proveniente de fuentes fósiles y sus consecuentes emisiones de carbono hacia la atmósfera, están incrementando el efecto invernadero adicional, trayendo consecuencias observables sobre el sistema climático. La dinámica poblacional y el crecimiento económico influyen directamente sobre el consumo de bienes, energía primaria, y por consiguiente, sobre dichas emisiones. A partir del Modelado Basado en Agentes (MBA), se construyó un modelo que simula la evolución de las emisiones de carbono teniendo en cuenta el comportamiento individual de los agentes constitutivos de la economía. La utilización de MBA permitió describir el sistema como el resultado de la interacción de individuos, incluyendo variabilidad en los parámetros y el concepto de elección de comportamiento. Se obtuvieron las curvas correspondientes a la evolución temporal del PBI/cápita, del crecimiento demográfico, del consumo de energía primaria y de las emisiones de carbono, como así también, de la acumulación de este último en la atmósfera. Los resultados obtenidos están en buen acuerdo con los datos históricos y con las proyecciones realizadas por diversas agencias internacionales.

1 INTRODUCCIÓN

A nivel global, los niveles crecientes de consumo de energía proveniente de fuentes fósiles y sus consecuentes emisiones de carbono hacia la atmósfera, están incrementando el efecto invernadero adicional, trayendo consecuencias observables sobre el sistema climático, como cambios en la temperatura global, variación de los patrones de lluvia, aumento del nivel del mar, modificaciones en la salinización del mar, reducción de los glaciares cordilleranos y polares, huracanes de gran magnitud. El análisis de la dinámica poblacional y del crecimiento económico, y a su vez, el estudio de su interrelación, son temas relevantes en el debate sobre el cambio climático, dado que influyen directamente sobre el consumo de bienes, energía primaria, y por consiguiente, sobre las emisiones de carbono.

Las tasas de crecimiento demográfico han disminuido durante los últimos cincuenta años en la mayoría de los países del mundo (United Nations, 2010), resultando a nivel global en una transición demográfica que enmascara en muchos sectores un envejecimiento de la población. Por un lado, las mejoras sociales y el cuidado de la salud resultan en una disminución de la mortalidad infantil y un incremento de la longevidad. Por otro lado, se observa en general una reducción de las tasas de fertilidad, relacionada con hechos como la participación femenina en el trabajo, la elección de la fertilidad, y el tiempo dedicado a capacitación individual (Becker and Lewis, 1973; Willis, 1973). En las sociedades que han ampliado su capital humano (niveles de educación elevados, mayor inversión en ciencia y tecnología, etc.), estas tendencias son más marcadas. Sin embargo, el mismo factor que ha contribuido al descenso de la fertilidad, ha elevado el nivel de educación de las personas jóvenes, acompañado de notables crecimientos de la productividad y los ingresos (Day and Dowrick, 2004; Lee and Mason, 2010).

Tanto el crecimiento poblacional y económico, como el nivel tecnológico alcanzado, son aspectos relevantes en la determinación del consumo energético y las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) provenientes del consumo de combustibles fósiles (Richmond and Kaufmann, 2006; Huang et al., 2008).

En este trabajo se presenta un modelo capaz de simular la evolución de dichas emisiones y su acumulación en la atmósfera, utilizando como herramienta el Modelado Basado en Agentes (MBA). El MBA es un paradigma de simulación a partir del cual un sistema se modela como un conjunto de entidades llamadas agentes. Dichos agentes son capaces de actuar y tomar decisiones en forma autónoma, sobre la base de un conjunto de reglas impuestas por el modelador, pudiendo ejecutar varias acciones de forma autónoma, interactuando a su vez con otros agentes y con su entorno. Asimismo, los agentes pueden evolucionar y adaptarse, lo que resulta muchas veces en el surgimiento de patrones emergentes como consecuencia de la interacción de componentes individuales (Edmonds, 2001). Utilizando este paradigma se buscó introducir variabilidades en los parámetros y el concepto de elección de comportamiento de los agentes, lo cual de otra manera podría haber implicado un gran costo computacional.

A partir del modelo propuesto se obtienen las curvas correspondientes a la evolución temporal del PBI/cápita, del crecimiento demográfico, del consumo de energía primaria, de las emisiones de carbono y de su acumulación en la atmósfera. Los resultados están en buen acuerdo con los datos históricos y con las proyecciones realizadas por diversas agencias internacionales (Nakicenovic et al., 2000; United Nations, 2010).

2 DESARROLLO DEL MODELO

Se construyó un modelo que simula el comportamiento de individuos y su repercusión en

la atmósfera para el período 1950-2100, usando el paradigma de Modelado Basado en Agentes (MBA). El mismo fue desarrollado bajo la plataforma Netlogo¹ 5.0.2 (Wilensky, 1999), la cual permite definir distintos tipos de agentes para trabajar de manera clara y ordenada.

El modelo presentado está formado principalmente por 2 módulos:

- Módulo de individuos y su entorno (módulo principal).
- Módulo del balance del ciclo de carbono.

En primer lugar se describe el módulo principal, formado por individuos y su entorno, en el cual se desarrolla toda la parte antrópica del modelo. En segundo lugar, se describe el módulo correspondiente al ciclo de carbono, el cual tiene en cuenta los equilibrios existentes entre los distintos reservorios y fuentes de carbono de la naturaleza.

2.1 Módulo de individuos y su entorno

En cada inicialización del modelo se crean agentes que simulan ser individuos pertenecientes a diferentes familias o dinastías. Dichos agentes son diferenciados de otros grupos de agentes a partir de su naturaleza o raza (*breed* en Netlogo), y los correspondientes a este módulo fueron denominados “individuos”. En adelante, cuando se mencione a un individuo o grupo de individuos, se estará haciendo referencia a un agente o grupo de agentes con dicha naturaleza o raza. Los individuos a su vez son diferenciados en 4 grupos según su edad cronológica: *Niños* (0 a 14 años), *Jóvenes* (15 a 49 años), *Adultos* (50 a 69 años) y *Ancianos* (≥ 70). Cada agente “individuo” se crea con un conjunto de valores iniciales en sus parámetros, que son actualizados con cada incremento de tiempo (Δt) a través de una serie de instrucciones.

Todos los individuos son económicamente activos e independientes, y poseen su propio capital físico, capital humano, tendencia al consumo y a la inversión en ambos tipos de capital, y consecuentemente, una dada tendencia a la generación de CO₂ como resultado del consumo de energía necesario para realizar sus actividades. Los mismos tienen la capacidad de elegir sus propias opciones de reproducción y de desarrollo económico en función de las costumbres familiares y de su formación personal. Como consecuencia de su crecimiento y desarrollo, los agentes consumen energía y generan emisiones. Las acciones individuales se combinan (como una sociedad) en un total (a partir de la suma de las mismas) para el consumo de energía y las emisiones de CO₂ a la atmósfera.

2.1.1 Aspecto económico

Dado que en este trabajo los individuos son considerados económicamente independientes desde el momento de su nacimiento, podría entonces cada individuo representar su propio hogar siendo además el referente o “jefe” del mismo. Se plantea entonces representar el desarrollo económico a partir del comportamiento e interacción de individuos económicamente activos, pertenecientes a una sociedad potencial. La evolución temporal del consumo y de los niveles de inversión en los distintos tipos de capital de los individuos pertenecientes a dicha sociedad potencial (o virtual), dependerán de cada individuo, de sus costumbres, de sus elecciones socio-económicas o “tipo de desarrollo” elegido, y a su vez, de su edad (Fougere et al., 2009; Lee and Mason, 2010; O.N.S., 2011; O’Neill et al., 2010).

Para representar la evolución del consumo y la inversión en distintos tipos de capital, desde

¹ El software Netlogo es una plataforma de simulación por agentes, que si bien incluye una amplia galería de modelos demostrativos de acceso libre para los usuarios, todo lo referido al diseño y construcción del modelo presentado en este trabajo es aporte exclusivo de los autores.

el punto de vista de cada individuo y como una función de su tiempo de vida (edad), en este trabajo se propone utilizar curvas en forma de campana invertida, tipo campana de Gauss. Dichas curvas muestran valores crecientes hasta llegar a un máximo ubicado en un determinado tiempo, a partir de la cual comienzan a decrecer. Dado que el MBA utiliza funciones discretas, se adoptó la edad de cada agente como variable de tiempo, ya que la misma aumenta linealmente con cada incremento de tiempo Δt ($\Delta t = 1$ año). De esta manera, el valor correspondiente al máximo de cada curva depende en parte de la naturaleza de la variable representada, y también de las opciones de comportamiento de cada individuo. Dichas opciones de desarrollo son descritas en la [Tabla 1](#), y su mecanismo de elección se describe en la sección [2.1.4](#).

Una vez establecido el mecanismo de evolución de dichas variables, en cada t todo agente obtendrá un nivel de producción (y) a partir de las magnitudes que ha dedicado al consumo ($cons$), a la inversión en capital físico (i_k) y/o a la inversión en capital humano (i_h), de la siguiente manera (Barro and Sala-i-Martin, 2004):

$$y = cons + i_k + i_h \quad (1)$$

Asumiendo que el capital físico (k) y el capital humano (h) se deprecian a la misma tasa δ , sus niveles para un dado tiempo ($t+1$) quedan definidos por los valores en t , más lo invertido en capital físico y humano, menos lo perdido por la depreciación del capital:

$$\begin{aligned} k_{t+1} &= i_k + (1 - \delta) \cdot k_t \\ h_{t+1} &= i_h + (1 - \delta) \cdot h_t \end{aligned} \quad (2)$$

Una vez obtenidos los valores para ambos tipos de capital, cada agente obtiene su nuevo nivel de producción (y) a través de la expresión (1), y sus niveles de capital físico k y humano h , a través de la expresión (2). Estos nuevos valores serán utilizados por los agentes para elegir, consumir e invertir en el tiempo ($t+1$). La suma de los niveles de producción (y) de todos los agentes representa el PBI de la población obtenida, y el promedio de los mismos, el PBI/cápita.

2.1.2 Aspecto demográfico

Los individuos creados en el modelo tienen la capacidad de reproducirse creando nuevos individuos pertenecientes a su propia familia. No se incorpora en este trabajo una diferenciación por sexo de los agentes, es por ello que todos los individuos en edad reproductiva poseen dicha capacidad, sin necesidad de apareamiento. Se plantea que los individuos en edad reproductiva son los pertenecientes al grupo de los *jóvenes*, entonces, una vez que un individuo ingresa a dicho grupo, evalúa una determinada cantidad de parámetros con el fin de elegir el momento y la posibilidad de reproducción. Estos parámetros son la edad mínima de reproducción y la cantidad máxima de hijos que haya elegido tener. Los valores correspondiente a cada parámetro dependerán de la opción de desarrollo elegida por el individuo (ver [Tabla 1](#)).

Cuando un individuo se reproduce, cede la mitad de su capital físico al nuevo agente, con el objetivo de lograr la independencia económica de ambos. De esta manera, el individuo nacido es considerado económicamente activo. Al nuevo individuo ($edad = 0$) se le asigna además un nivel de consumo y de inversión inicial proporcional al de su familia, y por lo tanto las decisiones iniciales de dicho agente están influidas por su entorno familiar.

A su vez, se les asigna a los individuos un valor correspondiente a la expectativa de vida, el cual queda determinado al momento de su nacimiento, y es asignado en forma aleatoria a partir de una distribución normal, con una media que resulta en valores mayores o menores según la opción de desarrollo del individuo (Tabla 1). De esta manera, 2 individuos con características similares compartirán un mismo rango de valores para su expectativa de vida, sin embargo a nivel individual, los valores específicos de dicho parámetro pueden ser distintos.

Una vez que el individuo llega a una edad igual a su expectativa de vida, muere (deja de existir), dejando como herencia su capital físico, el cual es repartido en partes iguales entre todos los individuos vivos de su familia. El número de dinastías permanece constante, mientras que el número de individuos de cada una varía de acuerdo al número de agentes que sobreviven en cada período. De esta manera, para cada t la población p es igual al número de agentes vivos.

2.1.3 Aspecto ambiental

Como consecuencia de su actividad, los individuos consumen energía y generan emisiones. A nivel global, tanto el consumo de energía primaria como las emisiones de carbono muestran un comportamiento vinculado al PBI/cápita y al crecimiento de la población, como así también a distintos indicadores tecnológicos. Estas relaciones pueden ser expresadas en forma multiplicativa de la siguiente manera (Canadell et al., 2007; Puliafito et al., 2008; Raupach et al., 2008; Puliafito and Castesana, 2009):

$$e = y \cdot \eta_e \quad (3)$$

Donde (e) es el consumo anual global de combustibles fósiles, y (η_e) es el factor de intensidad energética, es decir, la cantidad de energía consumida por cada unidad de producto bruto generado. De esta manera el consumo de energía de cada agente queda determinado por su nivel de producción actual (y), y por la intensidad energética con la que generó dicha producción. Los datos históricos (World Bank, 2011; British Petroleum, 2012) muestran una mejora constante en la intensidad energética global, que se traduce en un ahorro de energía por unidad de producción. Dicha mejora se puede relacionar con el uso de tecnologías cada vez más eficientes, lo cual está directamente relacionado con los niveles de inversión en I+D, o en este trabajo, con el capital humano.

Las emisiones de carbono (c) producidas por cada agente a partir del consumo de energía, pueden ser expresadas como sigue:

$$c = y \cdot \eta_e \cdot i_c \quad (4)$$

El factor i_c representa el índice de carbonización, o la cantidad de CO₂ emitido a la atmósfera por cada unidad de energía consumida. Dicho factor está fuertemente relacionado con las fuentes de energía utilizadas y el factor de emisión de cada una. Se observa que en la actualidad, países con economías fuertes y altos porcentajes de uso de energía nuclear o hidráulica presentan valores de índice de carbonización muy favorables, y en el otro extremo, se observan sectores con economías emergentes y altos porcentajes de uso de carbón (combustible con un factor de emisión superior al medio de los combustibles fósiles), los cuales muestran tendencias muy desfavorables (Castesana and Puliafito, 2011).

De acuerdo a lo descripto, la eficiencia con la cual los individuos consumen energía y generan emisiones, se encuentra fuertemente relacionada con el nivel de capital humano de

cada uno. El valor adoptado por cada individuo para dichos indicadores dependerá de la opción de desarrollo elegida, según lo detallado en la [Tabla 1](#).

A partir de la suma del consumo energético de todos los agentes vivos se obtiene el consumo global de energía, y a partir de la suma de las emisiones generadas por cada uno de ellos, se obtienen las emisiones totales de CO₂ de origen antrópico hacia la atmósfera.

Características	Opción #1	Opción #2	Opción #3	Opción #4
<u>Economía</u>	Baja tendencia a la inversión en capital físico y humano, bajos niveles de consumo. Los valores máximos son alcanzados a edades menores que otros individuos. Bajos niveles de producción (GDP/cápita). Muy bajos niveles de acumulación de capital físico y humano.	Tendencia media al consumo e inversión en ambos tipos de capital. Niveles de producción o GDP/cápita medios. Niveles intermedios de acumulación de capital físico y humano.	Alta tendencia al consumo y a la inversión en capital físico. Mayor predisposición a invertir en capital humano que el promedio mundial, pero menor que la <i>Opción #4</i> . Altos niveles de GDP/cápita. Gran acumulación de capital físico: Altas tasas de consumo.	Alta predisposición a la inversión en capital humano. Mayor tendencia al consumo y a la inversión en capital físico que la media mundial, pero menor que la <i>Opción #3</i> . Los individuos aumentan su inversión en capital humano incluso a edades mayores que el resto de las opciones. Altos niveles de GDP/cápita. Gran acumulación de capital humano.
<u>Fertilidad</u>	Muy alta tendencia a la reproducción. Número máximo de niños por individuo similar a la tendencia de los países menos desarrollados en 1950. Edad mínima de reproducción: 15 años.	Tendencia media a la reproducción. Número máximo de niños por individuo similar a la tendencia media mundial de 1950 (United Nations, 2010). Edad mínima de reproducción: 20 años.	Baja tendencia a la reproducción. Número máximo de niños por individuo menor a la tendencia media mundial en 1950. Edad mínima de reproducción: 25 años.	Muy baja tendencia a la reproducción. Número máximo de niños por individuo similar a la tendencia de las regiones más desarrolladas en la actualidad. Edad mínima de reproducción: 30 años.
<u>Expectativa de vida</u>	Baja, por debajo del promedio. Similar a la tendencia observada en los países menos desarrollados en 1950.	Media. Similar a la tendencia media mundial en 1950 (United Nations, 2010).	Alta, mayor al promedio. Similar a la tendencia observada en las regiones más desarrolladas en 1950.	Alta, mayor al promedio. Similar a la tendencia observada en las regiones más desarrolladas en la actualidad.
<u>Energía y Emisiones</u>	Niveles bajos e ineficientes de consumo de energía por individuo, relacionados con los bajos niveles de desarrollo económico. Factores de intensidad energética poco eficientes, similares a los factores menos favorables observados en los datos del período 1950-2010. Altos valores de índice de carbonización, similares a los observados en países que utilizan principalmente fuentes de energía ineficiente, como carbón o biomasa (British Petroleum, 2012).	Niveles medios de consumo de energía por individuo. Valores intermedios para los factores de intensidad energética y de índice de carbonización, similares a los valores medios observados en los datos del período 1950-2010.	Altos niveles de consumo de energía por individuo, relacionados con los altos niveles de desarrollo económico. Factores de intensidad energética más eficientes que el promedio mundial, pero menos eficientes que la <i>Opción #4</i> , similares a los factores más favorables del período 1950-2010. Bajos índices de carbonización, similares a los observados en países que utilizan fuentes de energía con muy bajas tasas de emisión, como hidráulica, nuclear, solar, etc.	Niveles altos y muy eficientes de consumo de energía por individuo, asociados a los altos niveles de crecimiento económico y desarrollo tecnológico. Factores de intensidad energética más eficientes que el resto de las opciones. Bajos valores de índice de carbonización, similares a los observados en países que utilizan fuentes de energía limpias o con muy bajas tasas de emisión, tales como hidráulica, nuclear, solar, etc.

Tabla 1: Opciones de desarrollo de los individuos.

2.1.4 Mecanismos de elección de la opción de desarrollo

Para elegir entre una opción de desarrollo u otra, los individuos comparan su capital humano (en el tiempo t) con el de un individuo de referencia de su misma edad, nacido en 1950 y desarrollado a través de un nivel alto de inversión en capital humano, según las curvas gaussianas propuestas para dicha variable. De dicha comparación surge el capital humano relativo (h_{rel}), el cual queda definido como el cociente entre el capital humano actual de cada individuo, y el capital humano del individuo de referencia a su misma edad. A su vez, los individuos observan la tendencia en la elección de los integrantes de su familia (en adelante “tendencia familiar”), es decir, el número de opción de desarrollo más repetido en la elección de los individuos de su propia familia. Cuanto mayor sea el capital humano propio respecto al del individuo de referencia, o cuanto más avocada se encuentre su familia a invertir en capital humano, mayor será la posibilidad de elegir opciones de desarrollo orientadas a la acumulación de dicho tipo de capital (opciones altas según lo descripto en la [Tabla 1](#)).

La [Figura 1](#) muestra un diagrama de doble entrada en el que se representa la opción de desarrollo a elegir por parte de cada individuo, en función de su capital humano relativo, y de la tendencia familiar. Como se puede observar, si bien los individuos que posean un nivel de capital humano menor al del individuo de referencia tenderán a elegir “bajas” opciones de desarrollo, el entorno familiar podrá influenciar positivamente dicha elección (hacia opciones más altas) cuando la tendencia familiar sea muy alta (*Opción #4*). Por otro lado, los individuos que posean un nivel de capital humano mucho mayor al del individuo de referencia tenderán a elegir la opción de desarrollo más alta, a no ser que su entorno genere una influencia negativa en dicha elección a partir de una tendencia familiar muy baja (*Opción #1*).

Sin embargo, la tendencia familiar influirá sobre la elección de los individuos siempre que la proporción de familiares que elijan la opción de desarrollo mayoritaria supere a un valor mínimo establecido. De esta manera se asegura que la elección familiar tendrá influencia sobre la elección de los individuos siempre y cuando exista una clara tendencia hacia alguna de las opciones. De lo contrario, cuando dentro de una determinada familia dicha tendencia se encuentre equilibrada entre los distintos tipos de opción de desarrollo, los individuos no modificarán su opción de desarrollo actual. Dichas situaciones son representadas por las zonas sombreadas de la [Figura 1](#) en las cuales los individuos mantienen su opción de desarrollo actual, independientemente de cuál es su capital humano y la elección de su familia.

		0	0.35	1	0	0.35	1	0	0.35	1	0	0.35	1
Mucho mayor	4		3		4		4		4		4		4
Mayor	2		3		3		4		4		4		4
Similar	0.75		2		2		3		3		3		3
Menor	0		1		1		2		3		3		3
		1			2			3			4		
		Tendencia opción familiar											

Figura 1: Opción de desarrollo a elegir por los individuos, en función del capital humano relativo y de la tendencia familiar.

2.2 Módulo del balance del ciclo de carbono

Con el objetivo de estimar la concentración de CO₂ en la atmósfera debido a las emisiones de origen antrópico, se introdujo en el modelo una subrutina dedicada al balance del ciclo del carbono, basada en el sistema de reservorios, niveles y tasas presentado por Houghton (2007), considerando los siguientes 6 reservorios principales: atmósfera, océano superior (incluye la biota superficial), océano profundo, vegetación (incluye la materia orgánica), suelo y reserva fósil, las correspondientes conexiones entre los mismos.

Para llevar dicho esquema a un modelo basado en agentes, se utilizaron las celdas correspondientes al entorno o medio en el cual se mueven los agentes. Se dividió dicho mundo en 6 compartimentos interconectados, como muestra la Figura 2, en donde cada uno representa uno de los reservorios descritos anteriormente. Para representar el nivel inicial de carbono en cada uno de ellos, se crearon, dentro del espacio delimitado por cada reservorio, un número de agentes proporcional al nivel de carbono inicial correspondiente al año 1950. Los agentes utilizados en el ciclo de carbono fueron denominados “carbonos”, y fueron dotados con características diferentes a las de los agentes “individuos”.

En el entorno descrito por la Figura 2 todos los “carbonos” se mueven libremente dentro de cada reservorio. Sin embargo, cuando alguno de ellos llega a una celda perteneciente a la interface entre dos reservorios que presentan intercambio de materia (en adelante “bordes”), el mismo debe evaluar la posibilidad de paso al reservorio contiguo, o de lo contrario, continuar dentro de su reservorio actual. Para ello, las celdas correspondientes a los “bordes” de cada reservorio (coloreadas con un tono más oscuro que el del reservorio original en la Figura 2) fueron dotadas de un parámetro denominado *pasa*, el cual puede tomar los valores 1 o 0, para autorizar el paso de los carbonos al reservorio contiguo, o para impedirlo, respectivamente. Las reglas impuestas fueron pensadas de manera tal que en cada instante t , todos los carbonos impactarán con alguno de los bordes del reservorio de pertenencia actual. Esto significa entonces que la probabilidad de que un carbono pueda pasar hacia el reservorio contiguo será equivalente a la proporción de celdas que permitan el paso (celdas con $pasa = 1$, representadas en rojo en la Figura 2) y el total de las celdas que conforman el borde del reservorio actual. Dicha proporción fue calculada en base a la tasa de intercambio de carbono desde el reservorio actual hacia el contiguo, y el nivel de carbono del reservorio actual (Houghton, 2007). Por ejemplo, la posibilidad de que un carbono pase desde un reservorio A hacia otro B en un intervalo de tiempo de 1 año (unidad discreta de tiempo utilizada en el modelo), está dada por el cociente entre el flujo (f_{a-b}), es decir, la cantidad de carbono que pasa de A hacia B por año, y el nivel de carbono actual del reservorio A (*Nivel A*):

$$\frac{\text{n}^\circ \text{ celdas con } pasa = 1}{\text{n}^\circ \text{ celdas interface}} = \frac{f_{a \rightarrow b}}{\text{Nivel A}} \quad (5)$$

Cabe aclarar que las zonas de interface entre dos reservorios que no presentan intercambio de carbono entre sí, no fueron consideradas como “bordes”, con el propósito de no introducir un error debido al diseño y disposición de los distintos módulos o reservorios. En dicho caso, si un carbono llega a una celda contigua a otro reservorio con el cual no existe intercambio de materia, el mismo cambiará su dirección de avance y continuará moviéndose en su reservorio actual hasta tocar alguna celda considerada “borde”.

Al inicializar cada corrida del modelo (setup) quedan establecidos todos los reservorios, sus conexiones con reservorios contiguos y sus niveles iniciales de carbono a partir de la introducción de agentes en forma proporcional a dichos valores. Una vez que el modelo comienza a correr, todos los parámetros referidos a las celdas del sistema del balance de

carbono se mantienen invariables. Por su parte, los carbonos se mueven sobre dichas celdas transitando todo el espacio según la restricción de paso de un reservorio a otro descripta. Sin embargo, la cantidad de carbonos existentes en cada instante t se ve incrementada por la acción antrópica, es decir, por la generación de emisiones por parte de los individuos del modelo. Esta acción se logra a partir de la incorporación de nuevos agentes “carbonos” al reservorio “atmósfera”, en forma proporcional a las emisiones de CO₂ liberadas por los individuos del módulo antrópico en cada t . Dichos carbonos tienen las mismas características que los creados inicialmente, excepto su color: los carbonos existentes en el sistema en 1950 se son dotados de un color amarillo, mientras que los carbonos originados por la actividad antrópica son de color negro (ver Figura 2). Esto significa que en cada instante t , tanto los carbonos iniciales como los carbonos de origen antrópico, se mueven a través del sistema de reservorios pudiendo ser identificados unos de otros. De esta manera, la cantidad de carbonos que se encuentren sobre un determinado reservorio en un instante t , será proporcional al nivel de carbono del mismo, y a su vez, y la cantidad de agentes que pasen de un reservorio a otro será proporcional al flujo de intercambio de los mismos.

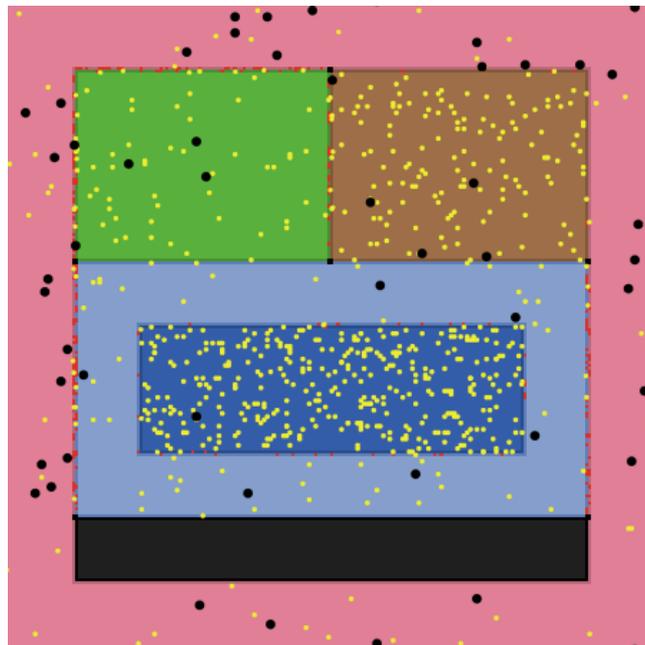


Figura 2: Módulos interconectados de reservorios de carbono: atmósfera (rosa), océano superior (celeste), océano profundo (azul), vegetación (verde), suelo (marrón) y reserva fósil (negro). Carbonos existentes en 1950 (círculos amarillos), carbonos originados a partir del modelo (círculos negros).

2.3 Condiciones iniciales

Se asumió como condición inicial un estado de equilibrio capaz de representar la distribución de la riqueza, y la distribución de la población en función de esta última, similares a las del año 1950. A partir de ello y reproduciendo dichas distribuciones, se crearon 20 familias con un nivel de riqueza media familiar determinado. Dentro de cada familia se reprodujo la distribución etaria de 1950, creando de esta manera una cantidad determinada de niños, jóvenes, adultos y ancianos. A cada individuo creado se le asignó una edad en forma aleatoria dentro del rango correspondiente a su grupo etario. Luego, a cada uno se le asignó un valor inicial de riqueza (o producción) en forma proporcional a la riqueza media inicial de su familia, guardando relación con su edad. A partir de ello, los valores y proporciones

correspondientes al capital humano, capital físico, inversión y consumo de cada agente fueron asignados a partir de la literatura existente (Barro and Sala-i-Martin, 2004).

Los valores iniciales correspondientes al módulo del balance de carbono fueron asignados a partir de los niveles de carbono existentes en cada reservorio en 1950 (Houghton, 2007).

A su vez, con el objetivo de lograr la estabilización de las condiciones iniciales, se agregó un tiempo de spin-up en el comienzo de cada ejecución.

3 RESULTADOS

Se realizaron 40 corridas del modelo, y se presentan los promedios de los resultados obtenidos ante las diferentes inicializaciones. Los resultados han sido normalizados al año 1950, con el fin de prescindir de unidades y mostrar variaciones relativas observadas y proyectadas en relación a dicho año.

La [Figura 3](#) muestra los valores obtenidos para la población mundial, en comparación con datos históricos y proyecciones (United Nations, 2010). En la [Figura 4](#) se representan los resultados para el PBI/cápita, junto con los datos históricos del mismo a nivel mundial (World Bank, 2011).

Por otro lado, la [Figura 5](#) muestra los resultados obtenidos para el consumo global de energía, y la [Figura 6](#) para las emisiones de CO₂ a la atmósfera, en comparación con los datos históricos y con distintos escenarios propuestos por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) (Nakicenovic et al., 2000; British Petroleum, 2012). Dichos escenarios fueron desarrollados por el IPCC sobre líneas evolutivas o enfoques cualitativos (en inglés “story lines”) que describen distintas combinaciones de desarrollo económico, demográfico, social y tecnológico. Cada enfoque evolutivo constituye una “familia” de escenarios. En este trabajo se han contrastado los resultados obtenidos, con los correspondientes al Modelo Integrado Asia-Pacífico (AIM) para los escenarios A2 y B1. La familia de escenarios A2 representa un mundo muy heterogéneo, con un continuo crecimiento de la población y un crecimiento económico orientado regionalmente, más lento que en otras líneas evolutivas. La familia B1 representa un mundo con un lento crecimiento de la población, y un rápido crecimiento económico orientado a servicios e información, con reducciones en el consumo de recursos y la implementación de tecnologías limpias (IPCC, 2007).

Finalmente, en la [Figura 7](#) se muestra el promedio obtenido a partir de las 40 corridas del modelo para el nivel de CO₂ en la atmósfera, expresado en Pg de C (1 petagramo = 1 gigatonelada = 10¹⁵ g de carbono), en comparación con los datos históricos correspondientes (Houghton, 2007).

Se observa que los resultados obtenidos están en buen acuerdo con los datos y las proyecciones realizadas.

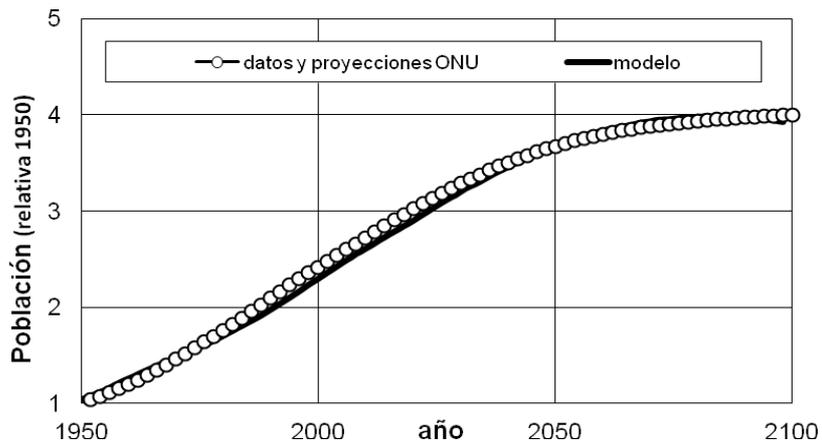


Figura 3: Población mundial (relativa al valor mundial del año 1950).

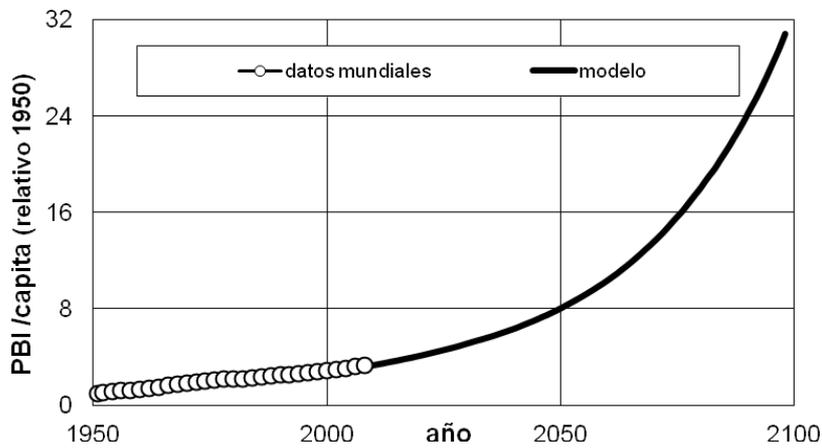


Figura 4: PBI/cápita (relativo al valor mundial del año 1950).

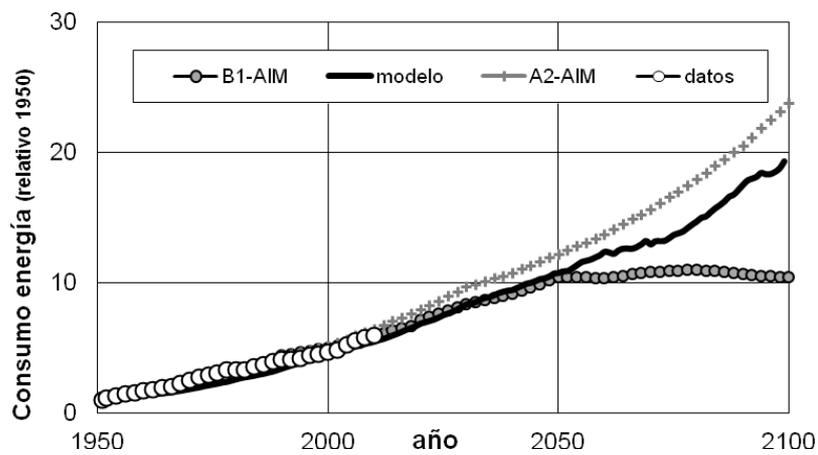


Figura 5: Consumo de energía (relativo al valor mundial del año 1950).

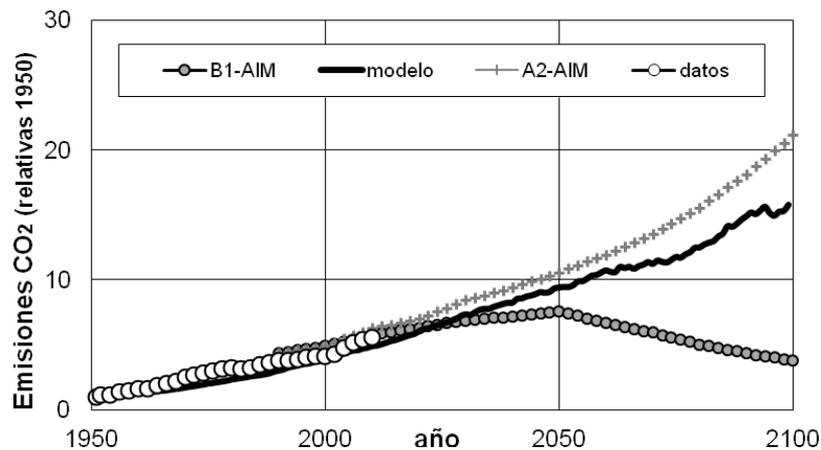


Figura 6: Emisiones de CO₂ a la atmósfera (relativas al valor mundial del año 1950).

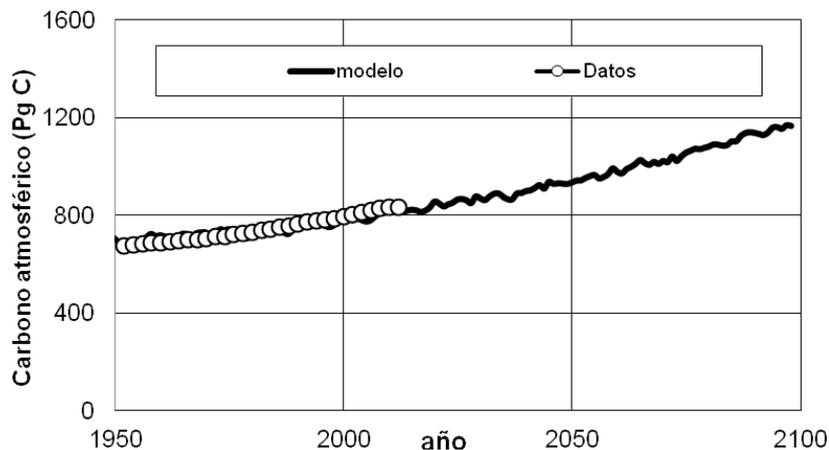


Figura 7: Nivel de CO₂ en la atmósfera (Pg de C).

4 CONCLUSIONES

Se simuló la evolución de las emisiones de CO₂ de origen antrópico a partir de la dinámica poblacional y del crecimiento económico de los individuos representativos de la economía, utilizando Modelado Basado en Agentes. Se obtuvieron resultados para la evolución temporal del crecimiento demográfico, del PBI/cápita, del consumo de energía primaria, de las emisiones de CO₂ y su acumulación en la atmósfera, para el período 1950-2010. Se observa que los mismos están en buen acuerdo con los datos históricos y con las proyecciones realizadas por diversas agencias internacionales.

La utilización del paradigma de simulación MBA permitió describir dichas variables como el resultado de la interacción de individuos con una determinada edad, capacidad de reproducción, supervivencia, tendencia al consumo y a la inversión. A su vez, se incluyó de forma sencilla el concepto de elección de comportamiento o toma de decisiones de los individuos y variabilidades en los parámetros, que de otra manera hubiesen resultado de un gran costo computacional. Trabajar con MBA permitió ajustar un modelo demográfico y económico capaz de representar entornos y condiciones necesarios para lograr distintos escenarios futuros. El estudio de dichas condiciones, el análisis de sensibilidad frente a

perturbaciones de las mismas, y las proyecciones de las emisiones obtenidas a partir de la aplicación del modelo resultante, nos indicarán las medidas y esfuerzos necesarios para producir una estabilización o reducción efectiva de las emisiones antrópicas de CO₂.

REFERENCIAS

- Barro, R., and Sala-i-Martin, X., Two-sector models of endogenous growth (with special attention to the role of human capital). In: *Economic Growth*. The MIT Press, Cambridge, Mass., U.S.A., pp. 239–284, 2004.
- Becker, G., and Lewis, H., On the interaction between the quantity and quality of children. *Journal of Political Economy*, 81, S279–S288, 1973.
- British Petroleum, *British Petroleum Statistical Review of World Energy June 2012*, London, United Kingdom. [available at www.bp.com/statisticalreview], 2012.
- Canadell, J., Le Quéré, C., Raupach, M., Field, C., Buitenhuis, E., Ciais, P., Conway, T., Gillett, N., Houghton, R., and Marland, G., Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104, 18866–18870, 2007.
- Castesana, P., and Puliafito, E., Influencia de la dinámica poblacional sobre las emisiones de carbono. Análisis de indicadores tecnológicos. *Revista Proyecciones*, 9, 11–24, 2011.
- Day, C., and Dowrick, S., Ageing economics: human capital, productivity and fertility. *Agenda*, 11, 3–20, 2004.
- Edmonds, B., The use of models - Making MABS more informative. *Multi Agent Based Simulation*, 1979, 15–32, 2001.
- Fougère, M., Harvey, S., Mercenier, J., and Mérette, M., Population ageing, time allocation and human capital: A general equilibrium analysis for Canada. *Economic Modelling*, 26, 30–39, 2009.
- Houghton, R., Balancing the Global Carbon Budget. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 35, 313–347, 2007.
- Huang, B., Hwang, M., and Yang, C., Causal relationship between energy consumption and GDP growth revisited: A dynamic panel data approach. *Ecological Economics*, 67, 41–54, 2008.
- IPCC, *Climate Change 2007: Synthesis Report, Assessment*. Cambridge University Press, 2007.
- Lee, R., and Mason, A., Some macroeconomic aspects of global population aging. *Demography*, 47 Suppl, S151–S172, 2010.
- Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., De Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grubler, A., Jung, T., Kram, T., La Rovere, E., Michaelis, L., Mori, S., Morita, T., Pepper, W., Pitcher, H., Price, L., Raihi, K., Roehrl, A., Rogner, H., Sankovski, A., Schlesinger, M., Shukla, P., Smith, S., Swart, R., Van Rooijen, S., Victor, N., and Dadi, Z., *IPCC Special Report on Emissions Scenarios (SRES), Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 2000.
- ONS, *Office for National Statistics*. Adapted from data from the Office for National Statistics licensed under the Open Government Licence v.1.0., United Kingdom. [available at <http://www.ons.gov.uk/ons/datasets-and-tables/index.html>], 2011.
- O'Neill, B., Dalton, M., Fuchs, R., Jiang, L., Pachauri, S., and Zigova, K., Global demographic trends and future carbon emissions. *Proceedings of the National Academy of*

- Sciences of the United States of America* 107, 17521–17526, 2010.
- Puliafito, E., and Castesana, P., Influencia del crecimiento económico y poblacional en el balance del ciclo de carbono. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 13, 25–32, 2009.
- Puliafito, E., Puliafito, J., and Conte Grand, M., Modeling population dynamics and economic growth as competing species: An application to CO₂ global emissions. *Ecological Economics*, 65, 602–615, 2008.
- Raupach, M., Canadell, J., and Le Quéré, C., Anthropogenic and biophysical contributions to increasing atmospheric CO₂ growth rate and airborne fraction. *Biogeosciences*, 5, 1601–1613, 2008.
- Richmond, A., and Kaufmann, R., Is there a turning point in the relationship between income and energy use and/or carbon emissions? *Ecological Economics*, 56, 176–189, 2006.
- United Nations, *Population Division of the Department of Economic and Social Affairs of the United Nations Secretariat. World Population Prospects: The 2010 Revision*. [available at www.un.org/esa/population/unpop.htm], 2010.
- Wilensky, U., *NetLogo: Center for connected learning and computer-based modeling*. Northwestern University, Evanston, IL, U.S.A. URL: <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>. Date accessed: July 2012, 1999.
- Willis, R., A new approach to the economic theory of fertility behavior. *Journal of Political Economy*, 81, S14–S64, 1973.
- World Bank, *World Bank database. World Development Indicators (WDI) and Global Development Finance (GDF)*, Washington (D.C.), U.S.A. [available at <http://databank.worldbank.org/>], 2011.