

## INFLUENCIA DEL CRECIMIENTO ECONÓMICO Y POBLACIONAL EN EL BALANCE DEL CICLO DE CARBONO

Enrique Puliafito<sup>1</sup>, Paula Castesana<sup>2</sup>  
Universidad Tecnológica Nacional  
Facultad Regional Buenos Aires, Medrano 951, Buenos Aires  
Tel.: (0261 5243003) [epuliafito@frm.utn.edu.ar](mailto:epuliafito@frm.utn.edu.ar)

**RESUMEN:** Un tema relevante en la investigación sobre cambio climático es el efecto que producen los cambios en la economía y en la población sobre el balance de carbono del planeta. El principal objetivo de este estudio es integrar dichas variables en un modelo dinámico basado en ecuaciones acopladas. El modelo está organizado en dos módulos. El primero calcula la población y las variables macroeconómicas como el PBI, PBI/cápita, consumo de energía y emisiones de carbono. El segundo calcula el balance de carbono a través de la atmósfera, océanos, suelo y vegetación. El modelo muestra que a largo plazo, la disminución de la población producirá una reducción del crecimiento del PBI, lo cual contribuirá a estabilizar o reducir el consumo de energía y las emisiones de carbono. Sin embargo, por efecto de acumulación en la atmósfera, no se espera una estabilización de las concentraciones de CO<sub>2</sub> en los próximos 100 años.

**Palabras clave:** Dinámica poblacional, crecimiento económico, ciclo de carbono, emisiones antrópicas, modelo dinámico.

### INTRODUCCIÓN

Las tasas de crecimiento demográfico han disminuido durante estos últimos cincuenta años en casi todos los países del mundo, observándose una reducción en las tasas de fertilidad y un aumento en la esperanza de vida al nacer. Este hecho genera cambios estructurales en la pirámide poblacional que tienden al envejecimiento de la población. Dicha transición es acompañada por aumentos en los ingresos y en el producto bruto interno (en adelante GDP) y por el uso masivo de combustibles fósiles, provocando un aumento en las emisiones de carbono hacia la atmósfera. El hecho de cómo las transiciones demográficas afectan al crecimiento económico mundial y regional, ha sido y sigue siendo objeto de estudio desde el siglo XIX. Actualmente este tema ha cobrado relevancia en el debate sobre el cambio climático, dado que, el impacto de dichas transiciones sobre el crecimiento económico, influye directamente sobre el consumo de bienes, energía primaria, y sobre las emisiones de carbono, modificando la acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera.

Este trabajo tiene como objetivo principal determinar la influencia de la dinámica poblacional sobre las emisiones de carbono. Para ello se propone un modelo basado en un conjunto de ecuaciones acopladas que describen los cambios de la población, el producto bruto interno (GDP), el consumo de energía primaria y las emisiones de carbono, mostrando a su vez las relaciones no lineales entre estas variables. Las estimaciones de la evolución temporal de dichas variables fueron calculadas para los años 1850-2150, y comparadas con los datos históricos y estimaciones de diversas agencias internacionales. Los escenarios obtenidos concuerdan con los datos y proyecciones mundiales para los próximos 100 años. El impacto de las emisiones globales sobre la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, se estima a través de un modelo de flujos de carbono que permite diferenciar los niveles de CO<sub>2</sub> provenientes de actividades naturales o antropóicas. Muchos modelos y estudios del ciclo de carbono han sido desarrollados por la comunidad científica (ver por ejemplo los recopilados por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático, IPCC: Watson et al., 1996). Por consiguiente, el objetivo de este estudio no es específicamente el estudio del balance de carbono, sino entender cómo los cambios en la población, GDP, consumo de energía y emisiones de carbono impactan sobre la concentración de CO<sub>2</sub> atmosférico, en un contexto globalizado. Los modelos mencionados se describen a continuación.

Varias fuentes de datos fueron consultadas para confrontar los resultados de las simulaciones. Las estadísticas históricas de población mundial y PBI fueron obtenidas del Centro Groningen de Crecimiento y Desarrollo (GGDC). El PBI es medido en dólares Geary-Khamis Internacionales de 1990. Los datos de consumo de energía fueron obtenidos de la Reseña Estadística de Energía Mundial compilada por la British Petroleum en 2009, cubriendo los años 1965-2008. Tanto datos históricos como proyecciones, fueron adquiridos de bases de datos de diversas agencias internacionales, tales como United Nations, U.S. Census Bureau, International Monetary Fund (FMI), Energy Information Administration (EIA), y el International Panel for Climate Change (IPCC), entre otros. Las emisiones de carbono debidas a la quema de combustible fósil fueron obtenidas del Centro de Análisis de Información de Dióxido de Carbono (CDIAC) y otras fuentes como Grubler, 2006. La unidad empleada por el modelo para medir consumo de energía es el Exa Joule (1 EJ = 10<sup>18</sup> J = 0.9478 Qbtu), mientras que las emisiones de carbono son expresadas en PgC (1Pg = 1 Gt = 10<sup>15</sup>g de carbono equivalente).

<sup>1</sup> CONICET, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mendoza/Facultad Regional Buenos Aires.

<sup>2</sup> Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires/ANPCyT.

## MODELO DE LA DINÁMICA POBLACIONAL

*Crecimiento económico y dinámica poblacional.*

La dinámica de la población de las especies se puede caracterizar, por ejemplo, a partir de un modelo logístico. La población mundial  $p(t)$  en los últimos 150 años se puede aproximar como una función logística  $y(t)$ , más un valor de base  $p_0$ :

$$p(t) = y(t) + p_0 \quad (1)$$

$$y(t) = \frac{K}{1 + \exp[-b(t - t_0)]} = \frac{K}{1 + a \exp(-bt)} \quad (2)$$

$$a = \frac{K - y_0}{y_0} = \exp(bt_0) \quad (3)$$

Para  $t=0$  (año 1850 para este estudio),  $p(1850) = y_0 + p_0$ . La constante  $b$  representa la tasa intrínseca de crecimiento natural de la población, y  $K$  el valor máximo para  $y(t)$ , llamado capacidad de carga del medio. El tiempo  $t_0$  es el punto de inflexión en la curva  $y(t)$  o el máximo para la curva de crecimiento  $dy/dt$ . Dicha curva se puede deducir derivando la expresión (2), obteniéndose una función con forma de campana, expresada por:

$$\frac{dy}{dt} = \frac{abK \exp(-bt)}{[1 + a \exp(-bt)]^2} \quad (4)$$

Derivando (4) respecto del tiempo e igualando a cero,  $d^2y/dt^2=0$ , se deduce que la función crecimiento de la población presentará un máximo en  $dy_{m\acute{a}x}=bK/4$ , para  $t_0=\ln(a)/b$ , y el punto de inflexión en la función logística población en  $y_{infl}=K/2$  para el mismo  $t_0$ .

De la misma manera que para la población, podemos estimar el GDP mundial  $g(t)$  a partir de una función logística  $z(t)$  y un valor de base  $g_0$ :

$$g(t) = g_0 + z(t) \quad (5)$$

$$z(t) = \frac{Q}{1 + \exp[-r(t - t_{0g})]} = \frac{Q}{1 + a_g \exp(-rt)} \quad (6)$$

Para  $t=0$ ,  $g(1850) = g_0 + z_0$ . La constante  $r$  representa tasa intrínseca de crecimiento natural del GDP,  $Q$  es el valor máximo de  $z(t)$ , y  $t_{0g}$  el máximo en la curva de crecimiento  $dz/dt$ . La Figura 1 muestra los datos de población y el GDP mundial (Madison, Grubler, 2008) junto a las estimaciones obtenidas a través de las funciones logísticas propuestas, con  $b=3,6\%$ ,  $y_0=0,045$  miles de millones de habitantes,  $p_0=1,200$  miles de millones de habitantes,  $t_0=1996$ ,  $K=9000$  millones de habitantes y  $r=4,5\%$ ,  $t_{0g}=2030$ ,  $Q=180$  billones de dólares.

Tanto la población como el GDP pueden representarse como funciones logísticas, por lo tanto el GDP per cápita  $f(t)$  también puede ser expresado como una función logística  $x(t)$  más un valor de base  $f_0$ . De manera similar a lo planteado en las ecuaciones (1) y (2):

$$f(t) = \frac{g(t)}{p(t)} = f_0 + x(t) \quad (7)$$

$$x(t) = \frac{R}{1 + \exp[-s(t - t_{0x})]} = \frac{R}{1 + a_x \exp(-st)} \quad (8)$$

Para  $t=0$  (año 1850),  $f(1850) = f_0 + x_0$ . La constante  $s$  representa la tasa intrínseca del crecimiento natural del GDP/cápita,  $R$  el valor máximo de  $x(t)$ , y  $t_{0x}$  el punto de inflexión en la curva. La Figura 2 muestra los valores del GDP/cápita recopilados por diversas agencias, y las estimaciones correspondientes a tres escenarios de desarrollo económico propuestos por el IPCC, en comparación con los valores arrojados por el modelo, para  $s=3,6\%$ ,  $t_{0x}=2000$  y  $R=18,0$  miles de dólares por habitante.

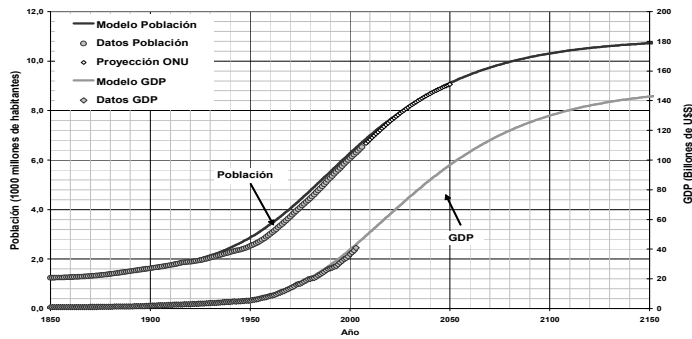


Figura 1: Valores de la población mundial en miles de millones de habitantes: con línea negra se muestran los resultados del modelo propuesto, con círculos grises los datos históricos, y con diamantes blancos las proyecciones de la ONU. Valores del GDP en billones de dólares: con línea gris se muestran los resultados del modelo propuesto, y con diamantes grises los datos históricos.

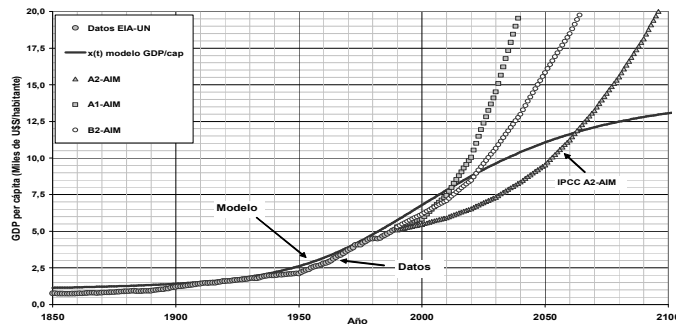


Figura 2: GDP/cápita en miles de dólares por habitante. Los datos correspondientes al período 1850-1990 se representan con círculos grises. Los valores correspondientes al escenario A2 se representan con triángulos grises, los correspondientes al escenario de crecimiento A1 con cuadrados grises, y el escenario B2 con círculos blancos. Los valores arrojados por el modelo propuesto se representan con línea negra.

De acuerdo al modelo “endógeno” de fertilidad de Jones (1995), o al modelo de desarrollo e investigación tecnológica de Romer (1990), la tasa de crecimiento porcentual del GDP/cápita es proporcional al producto de la tasa de crecimiento porcentual de la población, y una función  $\gamma$ :

$$\frac{1}{x} \frac{dx}{dt} = \gamma \frac{1}{y} \frac{dy}{dt} = \gamma(n - m) \quad (9)$$

El factor de proporcionalidad<sup>3</sup>  $\gamma$  mide el grado de crecimiento de los ingresos en economía. En ese contexto, las ideas de producción e investigación tecnológica ofrecen crecimientos sostenibles a largo plazo. Para nuestro caso se puede ver que las tasas de mortalidad  $m$  y de natalidad  $n$  están alcanzando un valor asintótico de 0.8-0.9% y 1.2-1.3% respectivamente. El modelo predice un aumento en la población y un consecuente crecimiento económico, solo si  $(n-m) > 0$ . Sin embargo, como  $(n-m)$  tiende a cero, el crecimiento también tiende a cero, y por lo tanto los resultados de la población y del GDP llegarán asintóticamente a un valor constante. La tasa de crecimiento porcentual del GDP será:

$$\frac{1}{z} \frac{dz}{dt} = \frac{1}{x} \frac{dx}{dt} + \frac{1}{y} \frac{dy}{dt} = (\gamma + 1) \frac{1}{y} \frac{dy}{dt} \quad (10)$$

Llamando  $\sigma = \gamma + 1$ , el crecimiento anual del GDP  $dz/dt$  estará relacionado con el crecimiento de la población  $dy/dt$ :

<sup>3</sup> Por ejemplo en el modelo R&D de Romer,  $\hat{A} = (1 - \phi)^{-1} \cdot \delta L \cdot A$ , donde  $A$  es la producción de ideas,  $\hat{A}$  es la tasa de producción de  $A$ ,  $L$  es el trabajo invertido en cada producción, y  $\delta$  es una constante.  $1/(1 - \phi) = \gamma \phi < 1$ .

$$\frac{dz}{dt} = \sigma \frac{z}{y} \frac{dy}{dt} \quad (11)$$

La regresión lineal de la ecuación (11), usando datos mundiales desde 1850 hasta el 2008, arroja un valor medio de  $\gamma=1.5$  (o  $\sigma = 2.5$ ), con una desviación estándar del 60%. Así mismo,  $\gamma$  muestra una pequeña pendiente, con una disminución de 0.0026/año. La Figura 3 muestra las curvas de crecimiento correspondientes a la población mundial,  $dy/dt$ , y al GDP,  $dz/dt$ . Finalmente, el modelo puede ser escrito como la combinación de dos ecuaciones diferenciales:

$$\begin{cases} \frac{dy}{dt} = \frac{abK \exp(-bt)}{[1 + a \exp(-bt)]^2} \\ \frac{dz}{dt} = \frac{z}{y} \sigma \frac{dy}{dt} \end{cases} \quad (12)$$

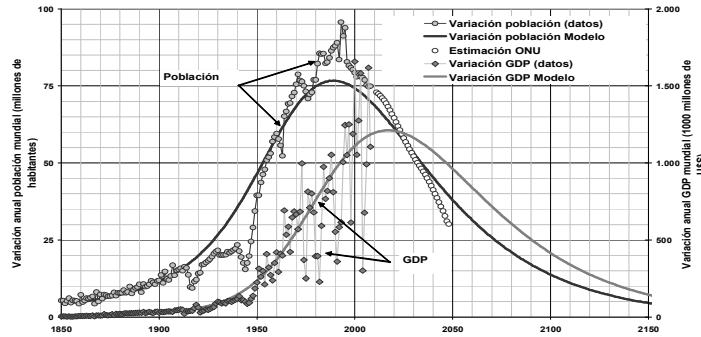


Figura 3: Variación anual de la población mundial en millones de habitantes: con línea negra se muestran los resultados del modelo propuesto, con círculos grises los datos históricos y con diamantes blancos las proyecciones de la ONU. Valores de la variación del GDP en miles de millones de dólares: con línea gris se muestran los resultados del modelo propuesto, y con diamantes grises los datos históricos.

#### Consumo energético y emisiones de carbono.

La variación en el consumo de energía primaria  $e$  y en las emisiones de carbono  $c$ , muestran un comportamiento vinculado al GDP/cápita  $x$  y/o al crecimiento de la población, como así también a la eficiencia tecnológica o intensidad energética. Estas relaciones pueden ser expresadas como una identidad (Raupach 2008, Canadell, 2007) de la siguiente manera:

$$e = p \times x \times (e/g) \quad (13)$$

Esta ecuación expresa el consumo anual global de combustibles fósiles  $e$  (EJ/año) como el producto de la población  $p$ , el GDP/cápita  $x$  y el factor de intensidad energética  $e/g$ , donde  $g$  es el GDP global. La intensidad energética ha variado para el período 1850-2008 con una tasa de aproximadamente  $-0.5\% \pm 0.4\%$  por año, desde 33 EJ/( $10^{12}$  U\$S año) en 1850 a 11.5 EJ/( $10^{12}$  U\$S año) en el 2000. La tasa de variación para el período 1960-2000 fue de  $-0.86\% \pm 0.5\%$ , con 17 EJ/( $10^{12}$  U\$S año) en 1960. Sin embargo, esta tasa de disminución se ha desacelerado en los últimos 5 años, principalmente debido al gran aumento de la demanda energética de los países asiáticos, los cuales presentan valores de eficiencia tecnológica muy bajos. Desde el año 2000 al 2008 la intensidad energética se ha mantenido casi constante. En la ecuación (13), la población y el GDP/cápita se calculan a partir del modelo endógeno, por lo que es necesario entonces estimar la variación temporal de  $e/g$  a partir de las variables del modelo  $g$  y  $p$ , mediante una regresión lineal de los datos existentes de la siguiente manera:

$$(e/g) = \frac{\omega_0}{g} + \frac{\omega_1}{p} + \omega_2 \quad (14)$$

$$e = \omega_0 + \omega_1 x + \omega_2 g \quad (15)$$

La ecuación (15), que resulta de reemplazar (14) en (13) y reordenarla, implica que el consumo de energía crece como una función del GDP y el GDP/cápita. Similarmente, las emisiones de carbono  $c$  debidas al consumo de combustibles fósiles pueden ser expresadas como:

$$c = p \times x \times (c/g) \times (N_h / N_{h0}) \quad (16)$$

El cociente  $c/g$  representa la intensidad de las emisiones y  $N_h/N_{h0}$  la disponibilidad de combustibles fósiles.  $N_{h0}$  (3700 a 10000 PgC) es el nivel de las reservas de combustibles fósiles para el año 1850 ( $t=0$ ) y  $N_h$  es el nivel actual en  $t$ . La tendencia de la intensidad de las emisiones  $c/g$ , ha disminuido desde 0.45 PgC/(10<sup>12</sup> U\$S año) en 1915 a 0.18 PgC/(10<sup>12</sup> U\$S año) en el año 2000, aumentando en los últimos años hasta 0.192 PgC/(10<sup>12</sup> U\$S año) para el 2008. Con un procedimiento similar al presentado para la energía, la tendencia de la intensidad de las emisiones puede ser estimada de la siguiente manera:

$$(c/g) = \frac{\epsilon_0}{g} + \frac{\epsilon_1}{p} + \epsilon_2 \quad (17)$$

$$c = (\epsilon_0 + \epsilon_1 x + \epsilon_2 g) \times (N_h / N_{h0}) \quad (18)$$

La ecuación (18) resulta de reemplazar (17) en (16). Se observa que incrementos en el GDP/cápita producen un aumento en el consumo energético y emisiones más elevadas. Así mismo, los países menos desarrollados presentan una gran demanda de energía impulsada por una población creciente y una menor eficiencia tecnológica. La Figura 4 muestra los valores arrojados por el modelo, tanto para el consumo de energía como para las emisiones de carbono (con  $N_{h0}=3700$  PgC), ambos en comparación con datos históricos y proyecciones.

Otra fuente de emisiones antropogénicas es la referida a los cambios de usos del suelo,  $Lua$ . La misma puede ser expresada como una función directamente proporcional a la tasa de crecimiento de la población  $dy/dt$  multiplicada por una constante  $Ku$  (millones habitantes)<sup>-1</sup> y por el valor del reservorio de vegetación  $Nv$  en PgC (explicado en la siguiente sección), más el flujo anterior al año 1850 como valor de base,  $Ru$ , en PgC/año:

$$Lua = Ku \cdot \frac{dy}{dt} \cdot Nv + Ru \quad (19)$$

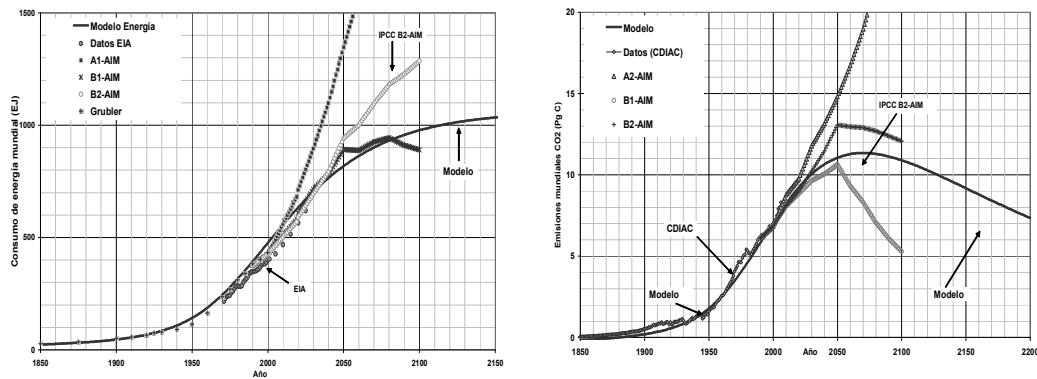


Figura 4: Izquierda: Consumo de energía en EJ (10<sup>18</sup> J). Los datos correspondientes al periodo 1850-1960 se representan con cruces negras en cuadrados grises, los distintos escenarios IPCC SRES A1-AIM, B1-AIM y B2-AM, con cuadrados negros, cruces negras, y círculos blancos, respectivamente. Derecha: Emisiones mundiales de CO<sub>2</sub> en PgC. Los datos históricos correspondientes al periodo 1850-2015 se representan con círculos grises, los distintos escenarios IPCC SRES A2-AIM, B1-AIM y B2-AM, con triángulos grises, círculos blancos, y cruces negras, respectivamente. En ambos casos, los valores arrojados por el modelo propuesto se representan con línea negra.

## MODELO PARA LAS CONCENTRACIONES DE CARBONO ATMOSFÉRICO

El ciclo del carbono es un ciclo biogeoquímico a través del cual el carbono se intercambia entre la biosfera, la litosfera, la hidrosfera y la atmósfera de la Tierra. La concentración media de dióxido de carbono en la atmósfera ha ido variando desde aproximadamente 280 ppm en el año 1850 a 380 ppm en el año 2000 (Keeling et al., 2005). La cantidad de carbono almacenado en la atmósfera ha aumentado de 600 a 800 Pg para el mismo periodo. Los océanos almacenan alrededor de 37000 PgC, situándose la mayor parte en aguas intermedias y profundas. La superficie de los océanos tiene aproximadamente 700-1000 PgC, en contacto con la atmósfera. La cantidad de carbono contenido en la vegetación terrestre es de aproximadamente 500 a 600 Pg, mientras que la materia orgánica en el suelo contiene alrededor de 1500 a 2000 PgC. El depósito de combustibles fósiles corresponde a carbón, petróleo y gas natural, los cuales son el resultado de la descomposición de la materia orgánica residual formada hace millones de años. El almacenamiento de carbono en este reservorio se estima en alrededor de 3700 a 10000 PgC. Una vez obtenido un modelo de emisiones antrópicas, desarrollamos un modelo de balances de flujos de carbono entre distintos reservorios del planeta, estimándolos a partir de un conjunto de ecuaciones diferenciales de primer orden, con el fin de entender cuál es la influencia de dichas emisiones sobre los niveles de dióxido de carbono atmosférico. Para ello se plantea primero un modelo para el ciclo natural de carbono, el cual se muestra en la Figura 5, que consta de reservorios (atmósfera, vegetación, materia orgánica, suelo, sedimentos, motor físico y

biológico del océano superior y océano profundo, y las reservas de combustibles fósiles) y los distintos tipos de flujo de intercambio entre ellos. Las velocidades de intercambio entre los reservorios ocurren en diversas escalas de tiempo, que van desde unos pocos segundos (fotosíntesis), hasta miles de años (acumulación de carbono fósil). Sin embargo, sólo incorporaremos los procesos que ocurren dentro de 100-200 años. Las tasas de intercambio entre el océano y la atmósfera son consideradas del orden de los 70 PgC/año, alcanzando en la actualidad cerca de los 90 PgC/año, debido al aumento del consumo de combustibles fósiles. La productividad primaria de los océanos se estima en 50 PgC/año. Las tasas de intercambio de la biota superficial a las profundidades del océano son del orden de los 11 PgC/año. El flujo de carbono desde la superficie hacia las profundidades del océano es de aproximadamente 100 PgC/año. Los intercambios de carbono entre la atmósfera y los ecosistemas terrestres son de aproximadamente 120 PgC/año. Según lo propuesto por el IPCC, suponemos que la atmósfera está equilibrada en  $t = 0$  (en este estudio, 1850), donde algunos flujos permanecen constantes, y otros varían en función de las emisiones antrópicas. Dichas emisiones relacionadas con la actividad humana, son básicamente el consumo de combustibles fósiles y los cambios de usos del suelo, factores que influyen directamente sobre el equilibrio del sistema de reservorios, modificando a su vez los flujos naturales del balance de carbono.

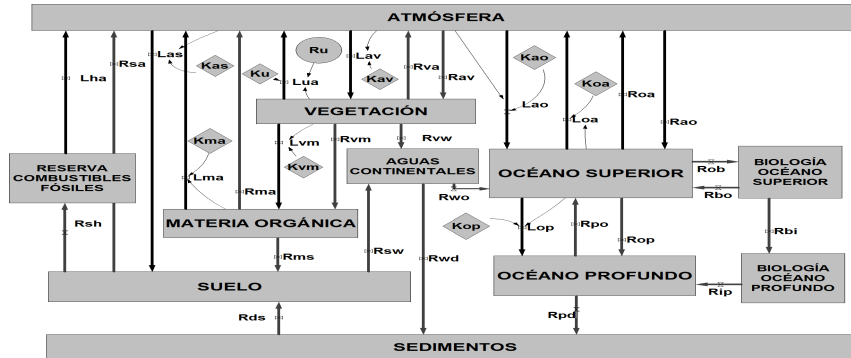


Figura 5: Modelo de reservorios para la estimación del balance de carbono.

El intercambio de carbono entre los ecosistemas terrestres, los océanos y la atmósfera puede ser descrito por un conjunto de ecuaciones diferenciales de primer orden detalladas a continuación (20). Los flujos constantes son representados con la letra  $R$ , y los flujos variables, afectados por la actividad humana, con la letra  $L$ . Para un momento determinado, los flujos variables  $L$  son calculados por el producto del nivel de carbono  $N$  del reservorio correspondiente, en PgC, y una constante  $K$  relacionada con los cambios poblacionales, en años<sup>-1</sup>. Los subíndices indican  $a$ : atmósfera,  $h$ : emisiones humanas por consumo de combustibles fósiles,  $v$ : vegetación,  $m$ : materia orgánica,  $s$ : suelo,  $u$ : cambio de usos del suelo,  $w$ : aguas continentales,  $o$ : motor físico del océano superior,  $p$ : motor físico del océano profundo,  $b$ : motor biológico del océano superior,  $i$ : motor biológico del océano profundo, y  $d$ : sedimentos oceánicos. De este modo  $N_a$  significa contenido de carbono en la atmósfera,  $L_{ao}$  indica flujo de intercambio de la atmósfera al océano superior,  $R_{pd}$  es la tasa de sedimentación entre el océano inferior y los sedimentos oceánicos. La variable  $c$  se obtiene a través del modelo Ec. (16). La Figura 6 muestra la comparación de los datos históricos con los valores arrojados por el modelo propuesto, para el incremento anual de dióxido de carbono atmosférico y para los flujos referidos al cambio de usos del suelo. Los datos básicos se tomaron de la literatura (Houghton, 2008). La tabla 1 muestra el valor de cada uno de los flujos utilizados en el modelo:

$$\begin{cases}
 \frac{dN_a}{dt} = C + R_{oa} + R_{ma} + L_{ma} + L_{oa} + R_{va} + L_{ua} + R_{sa} - R_{ao} - L_{ao} - L_{av} - R_{av} - L_{as} \\
 \frac{dN_v}{dt} = L_{av} + R_{av} - L_{ua} - R_{va} - R_{vm} - R_{vw} - L_{vm} \\
 \frac{dN_o}{dt} = R_{ao} + L_{ao} - R_{oa} - L_{oa} + R_{bo} + R_{po} + R_{wo} - R_{ob} - R_{op} - L_{op} \\
 \frac{dN_p}{dt} = R_{op} + L_{op} + R_{ip} - R_{po} - R_{pd} \\
 \frac{dN_i}{dt} = R_{bi} - R_{ip} \\
 \frac{dN_b}{dt} = R_{ob} - R_{bi} - R_{bo} \\
 \frac{dN_m}{dt} = R_{vm} + L_{vm} - R_{ma} - R_{ms} - L_{ma} \\
 \frac{dN_w}{dt} = R_{vw} + R_{sw} - R_{wo} - R_{wd} \\
 \frac{dN_h}{dt} = R_{sh} - C \\
 \frac{dN_d}{dt} = R_{pd} + R_{wd} - R_{ds} \\
 \frac{dN_s}{dt} = L_{as} + R_{ds} + R_{ms} - R_{sa} - R_{sw} - R_{sh}
 \end{cases}
 \quad (20)$$

Donde  $\rightarrow L_{ij} = K_{ij} \cdot N_i$

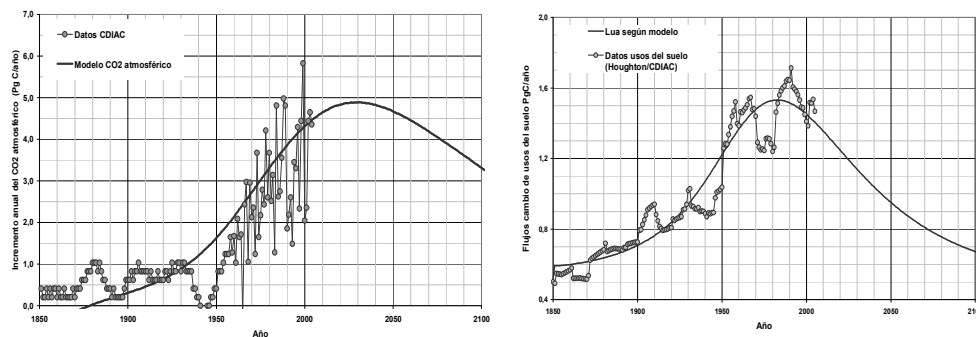


Figura 6: Izquierda: Incremento anual del CO<sub>2</sub> atmosférico en PgC/año. Los datos históricos son representados con diamantes grises. Derecha: Flujos referidos al cambio de usos del suelo en PgC/año. Los datos históricos son representados con cuadrados grises. En ambos casos la estimación obtenida por el modelo es representada con una línea negra. Los valores utilizados para el cálculo se muestran en la Tabla 1.

El modelo propuesto supone que el dióxido de carbono presente en la atmósfera  $q$ , en un dado  $t$ , es directamente proporcional a la cantidad de carbono presente en dicho reservorio  $N_a$ , para el mismo momento dado:

$$q(t) = q(t_0) \frac{N_a(t)}{N_a(t_0)} \quad (21)$$

Donde  $t_0$  es el año 1850,  $q(t_0) = 284$  ppm CO<sub>2</sub>, y  $N_a(t_0) = 597$  PgC. La Figura 7 muestra la comparación de los valores históricos, proyecciones del IPCC para distintos escenarios y la estimación realizada a partir del modelo, para la concentración de CO<sub>2</sub> atmosférico.

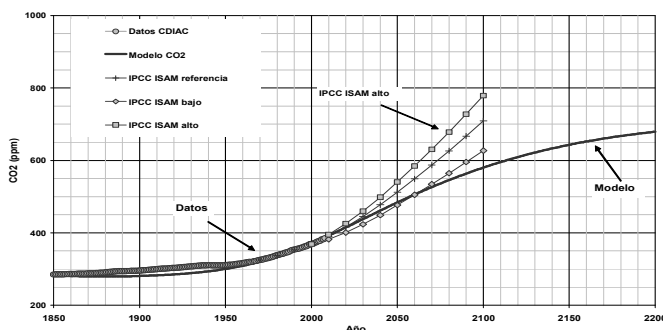


Figura 7: Concentración de CO<sub>2</sub> atmosférico en ppm. Los datos son representados por círculos grises, las proyecciones para los escenarios ISAM referencia, ISAM bajo e ISAM alto, con cruces negras, diamantes grises, y cuadrados grises, respectivamente. La estimación obtenida a partir del modelo presentado es representada con línea negra.

Valores iniciales a 1850	Símbolo	Valor	Unidad	Tasas anuales	Símbolo	Valor	Unidad
Atmósfera	Na	597	PgC	Cte. oc. superior-atm.	Roa	70.6	PgC/año
Vegetación	Nv	600	PgC	Var. oc. superior- atm.	Koa	20/918	año <sup>-1</sup>
Aguas continentales	Nw	300	PgC	Var. usos del suelo	Ku	0.35	10 <sup>9</sup> hab <sup>-1</sup>
Oc. profundo motor biol.	Ni	3	PgC	Cte. suelo- aguas cont.	Rsw	0.2	PgC/año
Oc. superior motor biol.	Nb	700	PgC	Variable atm.-oc. sup.	Kao	22.4/762	año <sup>-1</sup>
Oc. superior motor fis.	No	900	PgC	Cte. atm.-oc. superior	Rao	70	PgC/año
Oc. profundo motor fis.	Np	37100	PgC	Var. mat. orgánica-atm.	Kma	0.6/600	año <sup>-1</sup>
Sedimentos oceánicos	Nd	1500	PgC	Cte. mat. orgánica- atm.	Rma	58.8	PgC/año
Suelo	Ns	150	PgC	Var. atmósfera-suelo	Kas	0.8/762	año <sup>-1</sup>
Materia orgánica	Nm	300	PgC	Cte. suelo-atmósfera	Rsa	1.2	PgC/año
Reserva comb. fósiles	Nh	3700	PgC	Cte. oc. prof.-sedimentos	Rpd	0.02	PgC/año
<b>Tasas anuales</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Valor</b>	<b>Valor</b>	Cte. oc. prof- oc. superior	Rpo	101	PgC/año
Cte. atm.-vegetación	Rav	120.6	PgC/año	Cte. vegetación-atm.	Rva	60	PgC/año
Var atm.-vegetación	Kav	1.6/762	año <sup>-1</sup>	Var. oc. superior- oc. prof	Kop	1.6/918	año <sup>-1</sup>
Cte. usos del suelo	Ru	0.018	PgC/año	Cte. oc. superior- oc. prof	Rop	86.9	PgC/año
Cte. veg.- aguas cont.	Rvw	0.6	PgC/año	Cte. biología oc. sup.- oc. sup.	Rbo	39	PgC/año
Cte. veg.- mat. orgánica	Rvm	60	PgC/año	Cte. oc. sup.- biología oc. superior	Rob	50	PgC/año
Var. veg.- mat. orgánica	Kvm	1.2/610	año <sup>-1</sup>	Cte. biología oc. sup.- biología oc. prof.	Rbi	11	PgC/año
Cte. mat. orgánica- suelo	Rms	1.2	PgC/año	Cte. biología océano inferior- océano prof.	Rip	11	PgC/año
Cte. aguas cont- oc. sup.	Rwo	0.6	PgC/año	Cte. sedimentos- suelo	Rds	0.03	PgC/año
Cte. aguas cont- sedim.	Rwd	0.1	PgC/año	Var. reserva fósil-atm.	Kha	1	año <sup>-1</sup>
Cte. sedimentos- suelo	Rds	0.03	PgC/año	Cte. suelo- reserv. fósiles	Rsh	0.01	PgC/año

Tabla 1: Coeficientes del modelo para la estimación del balance de carbono.

## CONCLUSIONES

Los cambios en la economía y en la dinámica poblacional modifican el consumo de energía y la cantidad de emisiones de carbono de origen antropogénico. El carbono emitido es en parte absorbido por el océano y otros sumideros terrestres, y en parte acumulado en la atmósfera, de acuerdo al balance del ciclo de carbono. En este artículo hemos descrito un modelo dinámico conceptual que relaciona la población y las variables macroeconómicas como el PBI, PBI/cápita, consumo de energía y emisiones de carbono, y su influencia sobre el balance del ciclo de carbono, a través de la atmósfera, océanos, suelo y vegetación. Los resultados del modelo fueron comparados con los datos existentes, las proyecciones internacionales, y la literatura actual, obteniendo una concordancia adecuada tanto en los valores absolutos como en las tasas de crecimiento. Se observa que la disminución de la tasa de crecimiento de la población producirá una reducción del crecimiento del GDP. Este hecho, a largo plazo, tendrá como consecuencia una estabilización o reducción del consumo de energía y de las emisiones de carbono, siempre y cuando los valores de intensidad energética y de las emisiones, sigan manteniendo una tendencia decreciente. El incremento anual del CO<sub>2</sub> en la atmósfera, presentará un pico alrededor de los años 2040-2050, con un valor estimado en  $2.3 \pm 0.3$  ppm/año, o  $5 \pm 1$  PgC/año. No obstante, debido a los procesos de acumulación en la atmósfera, la concentración de CO<sub>2</sub> atmosférico no se estabilizará hasta los próximos 100 años. Por otra parte, estos valores se pueden ver modificados si los procesos naturales de retroalimentación saturan las tasas de intercambio de carbono entre el océano y la atmósfera, retrasando aún más la estabilización de las concentraciones de CO<sub>2</sub> en la atmósfera.

## REFERENCIAS

- BP (2009): BP Statistical Review of World Energy Junio 2009. British Petroleum. <http://www.bp.com/statisticalreview>
- Canadell J, Le Quérec C, Raupach M, Field C, Buitenhuis E, Ciais P, Conway T, Gillett T, Houghton R, Marland G. (2007). Contributions to accelerating atmospheric CO<sub>2</sub> growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. PNAS 104:18866-18870
- Grubler A. (2008). Energy transitions. En: Cleveland CJ (eds) Encyclopedia of Earth. Environmental Information Coalition, National Council for Science and the Environment, Washington, D.C.
- Houghton, R. (2007). Balancing the global carbon budget. Annual Review Earth and Planetary Sciences 35, 313-347
- IPCC (2007). Climate Change 2007. Synthesis Report. Contribución de los Grupos de Trabajo I, II y III en el cuarto Assessment Report del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático. En: Pachauri RK, Reisinger A (eds.) IPCC, Ginebra, Suiza.
- Jones, C. (1995). R&D Based Models of Economic Growth. Journal of Political Economy 103, 759-784.
- Keeling, C. y Whorf, T. (2005). Atmospheric CO<sub>2</sub> records from sites in the SIO air sampling network. En Trends: A Compendium of Data on Global Change. Carbon Dioxide Information Analysis Center, <http://cdiac.ornl.gov/trends/trends.htm>
- Maddison, A. (2008). Historical Statistics for the World Economy: 1-2006 AD. <http://www.ggd.net/maddison/>.
- Raupach M., Canadell J., Le Quérec C. (2008). Anthropogenic and biophysical contributions to increasing atmospheric CO<sub>2</sub> growth rate and airborne fraction. Biogeoscience Discuss. 5:2867-2896.
- Romer, P.M. (1990). Endogenous Technological Change. Journal of Political Economy, 98, 71-102.
- Watson R, Zinyowera M, Moss R (eds) (1996) Climate Change 1995. Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific Analyses. Contribución del Grupo de Trabajo II en el segundo Assessment Report del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático, Cambridge University Press, Cambridge, 861 pp.

## ABSTRACT

Population growth rates are declining in almost every country in the world, changing from high fertility rates and low life expectancy to lower fertility rates and higher life expectancy at birth. This transition was accompanied by an increase in gross domestic product (GDP) and income with a massive use of fossil fuel and raw material, leading to increasing levels of carbon emissions into the atmosphere. The main objective is to integrate in one model changing population-economic relations with the atmospheric carbon cycle. The model is organized in two modules. The first computes population and macroeconomic variables as GDP, GDP per capita, energy consumption and carbon emissions. The second module calculates the carbon budget cycle (stocks and fluxes). This model shows that in the long run population decline will produce a decrease in GDP growth, which will contribute to stabilize the energy consumption and carbon emissions. Nevertheless, due to accumulation process in the atmosphere, the atmospheric carbon concentration will not stabilize or decline in the next 100 years

**Keywords:** Population dynamics, economic growth, carbon cycle, anthropogenic emissions, dynamic model.